Collection
études et
recherches

Inventaire et validation des modèles de calcul du rayonnement solaire au Québec en vue des applications énergétiques

84- 4605

INVENTAIRE ET VALIDATION DES MODÈLES DE CALCUL DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU QUÉBEC EN VUE DES APPLICATIONS ÉNERGÉTIQUES

préparé pour la

Direction des programmes d'énergies nouvelles

du Ministère de l'Énergie et des Ressources

du Québec

1983

AVERTISSEMENT AU LECTEUR

Les opinions contenues dans le présent document n'engagent que leurs auteurs et ne doivent en aucune façon être interprétées comme étant nécessairement celles de la Direction des programmes d'énergies nouvelles ou du ministère de l'Energie et des Ressources. Au meilleur de la connaissance des auteurs, les données technico-économiques qu'il contient étaient exactes au moment de sa préparation. Elles se doivent toutefois d'être utilisées avec réserve, l'évolution rapide des contextes économiques et énergétiques pouvant en avoir grandement modifié la valeur.

Résumé

L'objectif de cette étude est de fournir aux intervenants impliqués dans l'utilisation énergétique de l'énergie solaire les moyens de base pour choisir le modèle de calcul du rayonnement solaire approprié à chaque type de problème.

Après description des sources de données concernant la météorologie et le rayonnement solaire au Québec, on présente un inventaire des différents types de modèles de calcul du rayonnement et une grille originale pour leur classification est proposée.

A partir de cette grille, cinq groupes de modèles représentatifs sont choisis dans autant de classes différentes, de façon à couvrir les principaux besoins en matière d'utilisation énergétique. Pour chaque groupe de modèles, une évaluation chiffrée de leur précision est obtenue au moyen de plusieurs paramètres statistiques, par comparaison avec les données de rayonnement mesurées à différentes stations. Pour chaque classe étudiée, des recommandations sont faites pour le choix du modèle qui apparaît le plus précis dans les conditions climatiques du Québec.

Enfin, on donne en annexe les résultats commentés d'une enquête menée en 1980 auprès des intervenants québécois en énergie solaire pour connaître leurs besoins en matière de rayonnement solaire, ces résultats ayant orienté la présente recherche.

Préambule

Ce document remis à la Direction des programmes d'énergies nouvelles du Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec constitue le rapport final concernant une subvention accordée à l'Université de Sherbrooke.

L'étude a été menée par une équipe d'ingénieurs composée de Christian Gueymard, Nicolas Galanis et Richard Chatigny avec la participation de Bruno Detuncq, consultant,et la collaboration du Service de la Météorologie du Québec.

Les demandes d'information supplémentaires concernant les données disponibles et leur accessibilité sur support informatisé peuvent être adressées au Service de la Météorologie, 194 avenue Saint-Sacrement, Québec G1N 4J5.

Des copies de ce rapport peuvent être obtenues auprès de la Direction des programmes d'énergies nouvelles, Ministère de l'Énergie et des Ressources, 8, rue Cook, 2e étage, suite 200, Québec (Québec) G1R 5H2.

L'équipe tient à remercier les personnes qui l'ont aidée (par la fourniture de données de base ou par un support technique) pendant la phase initiale de la recherche, en particulier MM. Robert P. Charette, Pierre Collins, Douglas Labelle, Richard Leduc, Don Mc Kay et Gaston Paulin.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE		1
INTRODUCTION		5
CHAPITRE 1 -	Source de données pour le calcul du rayonnement solaire au Québec	9
CHAPITRE 2 -	Méthode de classification des modèles	28
CHAPITRE 3 -	Evaluation de deux modèles horaires basés sur les observations météorologiques	44
CHAPITRE 4 -	Evaluation de deux modèles horaires pour la séparation des composantes directe et diffuse à partir de l'irradiation globale	111
CHAPITRE 5 -	Evaluation de quatre modèles calculant le rayonnement mensuel moyen à partir de la durée d'insolation	132
CHAPITRE 6 -	Analyse comparative de trois modèles calculant le rayonnement en valeurs mensuelles à long terme à partir de la durée d'insolation	158
CHAPITRE 7 -	Evaluation des modèles de conversion des valeurs journalières moyennes de rayonnement en valeurs horaires moyennes à long terme	177
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS		189
ANNEXE 1 -	Récapitulation des équations pour les modèles de calcul horaire du rayonnement sur un plan horizontal	192
ANNEXE 2 -	Enquête relative au rayonnement solaire auprès des intervenants québecois dans le domaine de l'énergie solaire	197

SOMMAIRE

Dans l'optique du développement de l'énergie solaire dans les secteurs résidentiel et industriel, le présent document vise à fournir aux intervenants dans ce domaine:

- une description des sources de données concernant le gisement solaire et les observations météorologiques qui peuvent être utilisées pour le calcul du rayonnement solaire
- un inventaire des différents types de modèles de calcul du rayonnement solaire, ainsi qu'une grille de classification permettant leur choix selon l'application envisagée et les données disponibles
- une évaluation quantitative de plusieurs modèles représentatifs des cinq classes les plus concernées par les principaux niveaux d'utilisation en matière d'applications énergétiques (qui vont des outils de recherche les plus complexes - simulation thermique horaire des bâtiments et systèmes solaires - aux méthodes de design simplifiées qui en dérivent mais sont opérables manuellement).

Il importe de noter que le problème de l'évaluation des modèles de calcul du rayonnement sur les plans inclinés n'a pu être abordé, faute de données mesurées au Québec.

Sources de données

Le réseau de mesure du rayonnement solaire est malheureusement très insuffisant en regard des besoins actuels. Ainsi Environnement Canada ne dispose que de six stations mesurant le rayonnement global au Québec, dont la moitié n'offre qu'un intérêt marginal pour les applications énergétiques du fait de leur situation nordique hors des bassins de population. D'autre part, l'absence de mesures de routine sur des plans inclinés limite considérablement les possibilités d'évaluation et de choix des modèles appropriés.

Dans une phase préliminaire de cette étude (décrite au chapitre 1), cinq stations-tests ont été retenues (Montréal, Normandin, Sept-Iles, Goose Bay et Ottawa), et des rubans contenant les données nécessaires à un traitement informatique ont été préparés. Ces rubans sont écrits suivant un format particulier, de façon à pouvoir lire facilement, pour chaque heure, l'ensemble des informations météorologiques utiles, ainsi que la durée d'insolation et le rayonnement solaire mesurés. Des copies de ces rubans ont été fournies au Service de la Météorologie du Québec pour qu'il puisse répondre plus facilement aux demandes des organismes de recherche.

Inventaire et classification des modèles

Une des motivations de cette étude repose sur la constatation que les intervenants ne disposent généralement pas des informations leur permettant de choisir le modèle de calcul du rayonnement qui convient à leur besoin spécifique (voir annexe 2). Le chapitre 2 est donc consacré à une discussion générale permettant une meilleure approche de ce problème. En particulier, on y propose une grille de classification à deux entrées (type de données d'entrée d'une part, et réduction temporelle préalablement subie par ces données d'autre part) qui facilite le choix du type de modèle le plus approprié. L'utilisation de cette grille est démontrée en permettant la classi-

fication de nombreuses références sélectionnées parmi une littérature abondante, ce qui constitue un inventaire détaillé des modèles existants.

Evaluation des modèles horaires de l'ASHRAE et de Won

Les deux modèles retenus pour évaluation au chapitre 3 peuvent être utilisés pour calculer heure par heure les composantes globale, diffuse et directe du rayonnement à partir des données météorologiques. Le modèle de l'ASHRAE est utilisé dans de nombreux programmes de simulation thermique des bâtiments et il était important d'en évaluer la précision pour pouvoir estimer le degré de fiabilité de ces programmes face à l'influence des apports solaires sur la charge thermique. Pour le rayonnement global, les deux modèles sont testés en comparant leurs prédictions aux mesures de rayonnement enregistrées à Montréal, Sept-Iles, Goose Bay et Ottawa pendant la période 1973-1976. Pour le rayonnement diffus, la même étude est reprise pour Montréal et Goose Bay seulement.

Plusieurs indices statistiques sont utilisés (erreur RMS, fréquence des erreurs relatives, biais à l'estimation) avec plusieurs périodes d'agrégation possible des données, et en recherchant l'effet obtenu en supprimant les valeurs inférieures à un certain seuil (dans l'optique des applications thermiques).

L'ensemble des résultats montre nettement la supériorité du modèle de Won, et l'imprécision inacceptable du modèle de l'ASHRAE pendant certains mois. En attendant une éventuelle amélioration de ce modèle (pour tenir vraiment compte des conditions climatiques du Canada), il s'avère préférable d'utiliser le modèle de Won. On recommande également une certaine réserve concernant les résultats de simulations thermiques de bâtiments solaires obtenues avec des programmes utilisant le modèle de l'ASHRAE.

Evaluation des modèles horaires utilisés dans les programmes TRNSYS et WATSUN

L'objet du chapitre 4 est l'évaluation des modèles horaires de Liu & Jordan et Orgill & Hollands, intégrés respectivement dans les programmes TRNSYS et WATSUN. Ces programmes sont utilisés pour la simulation dynamique des systèmes à énergie solaire. Avec ce type de modèle, le rayonnement global est supposé connu et le rayonnement diffus en est tiré au moyen d'une formule obtenue par corrélation. L'évaluation de la précision du calcul du rayonnement diffus est obtenue avec la même procédure qu'au chapitre 3, pour les stations de Goose Bay et Montréal, pendant la période 1973-1978. Il en ressort que le modèle d'Orgill & Hollands s'avère nettement le plus précis à la fois au niveau de l'erreur RMS et de la tendance à la sous-estimation qui atteignent un niveau inacceptable pour le modèle de Liu & Jordan. Une modification du programme TRNSYS pour incorporer le modèle d'Orgill & Hollands est donc recommandée pour une utilisation dans les conditions climatiques du Québec.

Evaluation de modèles calculant le rayonnement mensuel moyen

L'analyse de modèles empiriques simples, permettant le calcul du rayonnement mensuel moyen à partir de la durée d'insolation, fait l'objet des

chapitres 5 et 6. Au chapitre 5, les modèles de Gariépy, Hay, Iqbal et Rietveld sont testés pour la période 1973-1980 pour 8 stations, par comparaison aux valeurs mesurées moyennes des mois particuliers. Suivant la saison et les stations, le modèle de Gariépy ou celui de Hay obtiennent la meilleure performance. La séparation direct/diffus a également été investiguée et les corrélations d'Iqbal et de Gueymard et al. se sont avérées les plus intéressantes. Au chapitre 6, trois des mêmes modèles (Gariépy, Hay et Iqbal) sont testés toujours aux mêmes stations, mais en considérant des moyennes climatiques mensuelles à long terme, calculées sur 5 à 20 ans pour le rayonnement et 10 à 30 ans pour la durée d'insolation. Dans cette optique, les modèles de Gariépy et Hay s'avèrent encore les meilleurs pour le calcul du rayonnement global. Leur combinaison avec une corrélation d'Iqbal permet une séparation satisfaisante des composantes directe et diffuse. Ces modèles peuvent donc être recommandés pour le calcul de données de rayonnement moyen à long terme, nécessaires à l'utilisation des méthodes simplifiées de design pour systèmes solaires.

Evaluation des modèles de répartition horaire

Un dernier type de modèles est évalué au chapitre 7. Ils permettent de calculer les valeurs horaires moyennes (à long terme) du rayonnement global ou diffus connaissant leurs valeurs journalières respectives. Ce type de modèle est utilisé dans certaines méthodes de design, comme celles basées sur l'utilisabilité du rayonnement. Les modèles existants sont testés à Goose Bay, Montréal et Toronto et démontrent une excellente performance. Pour des raisons de facilité de calcul, le modèle de Collares-Pereira & Rabl peut être préféré à celui de Klein. Ce type de modèle peut être combiné à ceux du chapitre 6, sans augmenter sensiblement le niveau d'imprécision.

Enquête

En annexe 2 sont compilés les résultats d'une enquête effectuée en 1980 auprès des intervenants québécois en énergie solaire pour connaître leur implication au niveau du calcul du rayonnement. Les 38 réponses reçues ont montré qu'une majorité de répondants avaient de la difficulté à obtenir les données dont ils avaient besoin. En particulier, la nécessité d'une publication regroupant des données climatiques compilées a été mise en lumière. En ce qui concerne le choix du modèle approprié pour le calcul du rayonnement solarié, le présent document devrait leur apporter satisfaction, du moins en ce qui concerne le cas du plan horizontal.

Conclusion et recommandations

Le présent document devrait constituer une référence de base pour tous les intervenants confrontés d'une part avec le problème de recherche et d'utilisation des données météorologiques reliées au rayonnement solaire, et d'autre part avec le problème du choix d'un modèle permettant le calcul précis du rayonnement incident à partir des données disponibles dans le cadre d'une utilisation donnée.

Les nombreux modèles testés couvrent une grande partie des applications énergétiques possibles, en particulier dans le domaine de la simulation

horaire et du design. Cela se traduit par des calculs dont les niveaux de complexité sont très divers.

Les résultats montrent que la précision des modèles n'est pas toujours satisfaisante, surtout en ce qui concerne les calculs horaires aux fins de simulation thermique.

Des recommandations spécifiques ont été émises pour le choix du (ou des) modèle le plus approprié à chaque type d'utilisation.

Les recommandations générales sont que:

- des recherches soient poursuivies pour l'obtention de modèles de meilleure précision dans presque toutes les catégories analysées
- des mesures de routine du rayonnement solaire reçu par des surfaces inclinées soient entreprises dès que possible pour pallier le manque grave de données de base à ce niveau
- les résultats de simulations horaires de systèmes solaires obtenus avec le programme TRNSYS ou avec les programmes utilisant les algorithmes de l'ASHRAE doivent être utilisés avec jugement et précaution.

INTRODUCTION

Dans les applications du rayonnement solaire à des fins énergétiques, il est primordial de pouvoir connaître avec exactitude les ressources en rayonnement du site étudié.

Le développement de la recherche sur l'énergie solaire ayant été très rapide, les services météorologiques du monde entier n'ont pas pu installer des réseaux de mesure de densité suffisante pour que l'on dispose maintenant des données statistiques permettant de caractériser les ressources en rayonnement (ou «gisement solaire») de chaque région.

Compte tenu de la variabilité importante du rayonnement solaire incident, il serait souhaitable de pouvoir disposer de banques de données comparables à celles qui existent pour la température et la précipitation, et qui proviennent de stations ayant généralement accumulé dix à trente ans de données.

Pour fixer les idées, il y avait au Québec en date du 1er janvier 1978:

(i) 495 stations de température, dont 357 avaient accumulé au moins dix ans de données, 208 au moins vingt ans et 119 au moins trente ans.

(ii) 568 stations de précipitation, dont 399 avaient accumulé au moins dix ans de données, 215 au moins vingt ans et 124 au moins trente ans.

(iii) Six stations mesurant le rayonnement global, dont deux avaient accumulé au moins dix ans de données, et deux au moins vingt ans, et aucune au moins trente ans.

(iv) Une station mesurant le rayonnement diffus et ayant accumulé treize ans de données.

(v) Aucune station mesurant le rayonnement sur des plans inclinés.

Devant cet état de fait, il devient évident que les intervenants dans le domaine de l'énergie solaire ont un gros handicap causé par le manque de données précises sur le gisement solaire. Dans ces conditions, il n'est pas surprenant de constater qu'en dehors des questions de rentabilité économique, la question la plus souvent posée par les utilisateurs potentiels de l'énergie solaire aux spécialistes soit du genre: «Mais y a-t-il vraiment assez de soleil au Québec pour que ça marche?»

S'il est relativement facile de répondre globalement par un oui à une telle question, il est beaucoup plus difficile d'apporter les renseignements chiffrés précis qui permettraient de faciliter l'action des concepteurs de projets solaires.

Ce manque de données constitue ainsi une difficulté venant s'ajouter aux nombreux freins d'ordre technique ou socio-économique qui limitent actuellement le développement de cette source d'énergie renouvelable.

Comme il est maintenant certain pour des raisons budgétaires que les réseaux de mesure du rayonnement solaire ne vont pas être développés comme il le faudrait pour rattraper le retard actuel, la seule solution pratique au problème consiste à utiliser au maximum les données existantes, et à développer des modèles mathématiques suffisamment précis pour pouvoir reconstituer des données de rayonnement manquantes à partir d'autres paramètres météorologiques disponibles.

Mais le manque actuel d'information scientifique synthétique sur les possibilités de traitement des données de rayonnement solaire fait que les concepteurs de systèmes solaires en sont actuellement réduits à devoir utiliser pour le design de leurs projets des méthodes très empiriques, voire même douteuses quant au calcul du rayonnement solaire incident. Des erreurs importantes en découlent généralement, se répercutant sur les caractéristiques du design, et entraînant presque infailliblement un écart regrettable entre les performances attendues du système et les performances réellement obtenues.

D'une manière générale, des données de base sûres et de bons modèles de calcul sont nécessaires pour pouvoir évaluer la faisabilité des projets, pour déterminer leur meilleur emplacement possible, pour dimensionner et orienter les surfaces de captage, pour prévoir leurs risques de surchauffe, pour évaluer les caractéristiques du système de stockage généralement indispensable, et aussi pour estimer le rendement des installations en fonction de l'énergie incidente.

Ainsi, de nombreuses questions conditionnant la mise au point de différentes technologies solaires, leur insertion dans une politique énergétique globale, leur incidence sur l'aménagement du territoire, ainsi que leur rentabilité, ne pourront recevoir de réponse valable tant que les intervenants ne disposeront pas des outils nécessaires.

Dans cette optique, le présent travail se propose de répondre aux objectifs suivants:

(i) Guider les concepteurs dans leur recherche d'informations concernant les données solaires et/ou météorologiques dont ils ont besoin.

(ii) Fournir aux intervenants dans le domaine de l'énergie solaire les moyens de choisir le meilleur modèle de calcul du rayonnement solaire qui convienne plus particulièrement à un type de problème précis (simulation thermique, conception détaillée ou simplifiée, etc.)

(iii) Apporter aux chercheurs spécialisés dans les différentes disciplines de l'énergie solaire un document actualisant les connaissances en modélisation du rayonnement solaire et indiquant les besoins de recherche.

(iv) Donner au Service de Météorologie du Québec les outils simples lui permettant d'une part de répondre rapidement aux besoins des concepteurs en matière de gisement solaire, et d'autre part de pouvoir constituer un atlas du rayonnement à l'image de ce qui existe déjà dans d'autres pays.

Ceci fournirait aux divers intervenants un outil essentiel pour déterminer rapidement les ressources solaires d'un site donné, ou évaluer régionalement les économies d'énergie possibles, ou encore définir les régions prioritaires pour lesquelles des systèmes solaires seraient compétitifs avec les énergies classiques disponibles localement.

Notons que le rayonnement solaire intervenant dans de nombreux processus naturels, le présent travail devrait profiter largement à des disciplines situées en dehors de la technologie solaire proprement dite. Ainsi par exemple, les climatologistes, écologistes, forestiers, agrométéorologues et hydrologues sont souvent à la recherche de méthodes de calcul du rayonnement solaire pour remplacer les données manquantes.

Malgré tout, il faut admettre que cette étude ne pourra répondre à toutes les questions que se posent les concepteurs, à cause de limitations d'ordre budgétaire et scientifique. Ainsi, dans le présent travail, seule la précision des estimations de rayonnement reçu par un plan horizontal a pu être évaluée pour le Québec, puisqu'il n'existe pas ici de séries de données mesurées sur des plans inclinés.

D'autre part, différents contacts personnels et les résultats d'une enquête effectuée en 1980 auprès des intervenants québécois en énergie solaire (voir en annexe 2) montrent qu'ils existent un besoin certain pour une publication synthétique, du type «Manuel de calcul et d'utilisation des données nécessaires aux applications de l'énergie solaire», et qui présenterait notamment les notions de base clairement exposées, des exemples de calcul pour chaque type d'application, etc. Le présent rapport ne pouvant prétendre se substituer à un tel ouvrage, un effort de simplification portant sur la terminologie et de mise sous forme accessible des notions théoriques de base et des algorithmes de calcul a été apporté lors de sa rédaction.

Au niveau méthodologique, une étude bibliographique intensive a d'abord permis de faire le relevé d'une bonne centaine de modèles permettant le calcul du rayonnement de manière plus ou moins sophistiquée. Dans le but de pouvoir assigner tel modèle à tel type d'application, une méthode de classification matricielle de ces modèles a été élaborée (chapitre 2). Parmi les classes de cette grille, cinq ont été jugées les plus importantes dans le domaine des applications énergétiques du chauffage solaire. Dans chacune de ces classes, un petit nombre de modèles a été extrait de la littérature, en choisissant en priorité ceux qui se prêtaient apparemment le mieux aux applications en génie et en architecture, et qui avaient été développés à partir de données canadiennes pour limiter les sources d'erreur.

Les deux, trois ou quatre modèles retenus (suivant les cas) dans chacune des cinq classes ont ensuite été testés séparément par rapport aux données mesurées à plusieurs stations (chapitres 3 à 7). Pour chaque classe, des recommandations ont été données pour le choix du modèle le plus approprié, selon différents critères. Il est en effet souvent difficile de déclarer que «tel modèle est le meilleur au Québec» de manière absolue, dans la mesure où des conditions locales ou saisonnières affectent la précision des modèles, et que les tests statistiques caractérisant les erreurs d'estimation ne sont pas toujours concordants.

Une particularité importante et originale de ce travail réside dans le fait qu'une double méthode d'évaluation a été retenue pour les modèles voués aux simulations thermiques horaires (chapitre 3). En effet, d'un point de vue fondamental (qui prévaut par exemple dans les applications météorologiques), un «bon» modèle doit nécessairement pouvoir donner des estimations précises par n'importe quelle condition atmosphérique. Par contre, d'un point de vue appliqué (qui prévaut dans le domaine de la thermique solaire), il suffit qu'un modèle donne des estimations précises pour les cas où la quantité de rayonnement incident est telle que le bilan d'énergie du système à énergie solaire est positif. On sait en effet que des capteurs solaires plans (par exemple) ne commencent à fournir de l'énergie utile que lorsque le rayonnement incident dépasse un certain seuil critique. L'estimation — même très imprécise — des valeurs de rayonnement inférieures à ce seuil est alors sans objet et ne devrait pas pénaliser un modèle.

Enfin, bien que la précision des estimations du rayonnement incident sur des surfaces inclinées ne soit pas abordée dans ce travail, il ne faut pas oublier que de telles estimations supposent que le rayonnement solaire incident sur le plan horizontal est connu à priori.

Le choix d'un modèle précis de calcul du rayonnement sur l'horizontale constitue donc une étape cruciale, et les erreurs commises par le modèle qui permet de tenir compte de l'inclinaison de la surface ne font qu'augmenter l'imprécision du départ.

Il faut d'ailleurs ajouter que les mesures de rayonnement sur des plans inclinés sont encore très rares dans le monde. Au Canada, seules les stations de Toronto et Vancouver ont été équipées pour cela, et ce en 1976. Il est évident que ce n'est pas une base de données suffisante pour étudier tous les problèmes (climatiques ou autres) qui se posent.

CHAPITRE 1 - SOURCES DE DONNÉES POUR LE CALCUL DU RAYONNEMENT SOLAIRE AU QUÉBEC

1.1 Les données de rayonnement

Au niveau du design, la préoccupation des concepteurs des systèmes solaires est de pouvoir quantifier l'énergie parvenant au capteur envisagé, et éventuellement de choisir le site le plus favorable pour cette implantation.

Or, les stations de mesure du rayonnement sont très rares. Ainsi au Québec, seulement six stations mesurant le rayonnement global sur un plan horizontal sont actuellement en service opérationnel. Ces stations (tableau 1.1 et carte 1) sont gérées par Environnement Canada, qui se charge du contrôle des mesures et de leur publication.

Il faut ajouter que dix-huit autres stations sont opérées par le Service de Météorologie du Québec. Malheureusement, la plupart des pyranomètres de mesure utilisés ne peuvent pas être considérés comme fiables et précis, et surtout les données ne sont pas accessibles actuellement, car elles n'ont pas pu encore être dépouillées, vérifiées et publiées.

Parmi les six stations du réseau d'Environnement Canada, trois sont situées bien au-delà du 50° parallèle et leurs mesures n'ont donc qu'une utilité marginale pour les concepteurs en énergie solaire. Ainsi, seules les stations de Montréal, Normandin et Sept-Iles peuvent être considérées comme utiles pour l'instant. Heureusement, quelques stations limitrophes (tableau 1.2) peuvent s'avérer intéressantes, soit directement pour les concepteurs, soit dans le cadre d'une évaluation des modèles de calcul de rayonnement à l'échelle mésoclimatique.

Lorsqu'un projet doit être implanté dans une région éloignée des stations mesurant le rayonnement, il ne reste au concepteur que la possibilité de pouvoir estimer la quantité de rayonnement disponible localement à partir d'autres données reliées au rayonnement solaire.

Dans ce but, deux types de données sont disponibles: les <u>données météorologiques</u> et les <u>données d'insolation</u>.

Les mesures de rayonnement incident sur le plan horizontal sont publiées mensuellement par Environnement Canada depuis janvier 1960 [1.1]. Des «<u>normales</u>» de rayonnement (c'est-à-dire les valeurs moyennes mensuelles pour des périodes de mesure de dix ans environ, les guillemets indiquant que cette définition diffère de la terminologie statistique) ont également été compilées et cartographiées à l'échelle du Canada [1.2].

TABLEAU 1.1 - Stations mesurant le rayonnement solaire au Québec-Réseau actuel d'Environnement Canada

A: Aéroport CDA: Canadian Dept. of Agriculture

Station	Lat.	Long.	Alt.	Mise en service	Ray. global	Ray. diffus	Remarques
	(degrés centésimaux)		(m)				
Inoucdjouac	58.45	78.12	5	déc. 1972	x	—	
Kuujjuac (Fort Chimo,A)	58.10	68.42	36	déc. 1972	x	—	
Montréal (Jean Brébeuf)	45.50	73.62	133	oct. 1964	x	x	1
Nitchequon	53.20	70.90	536	janv. 1973	x	—	
Normandin, CDA	48.85	72.53	137	nov. 1957	x	—	2
Sept-Iles, A	50.22	66.27	58	fév. 1973	x	—	

Remarques

1- Des mesures de rayonnement global ont été effectuées entre avril 1956 et septembre 1964 avec un pyranomètre moins précis que celui actuellement en service.

2- Une interruption des mesures a eu lieu entre mars 1969 et février 1970 pour modification de l'appareillage.

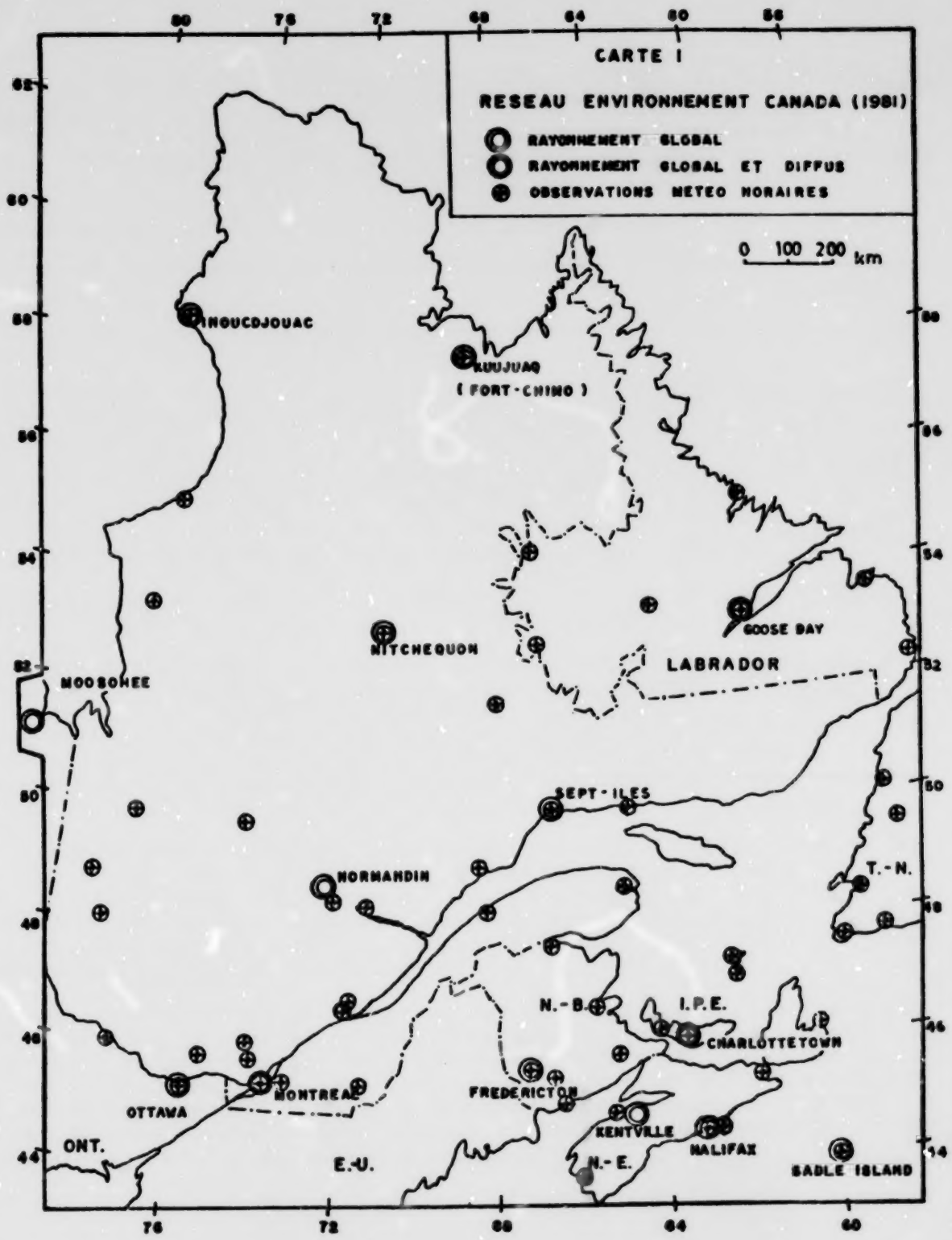

CARTE I
RESEAU ENVIRONNEMENT CANADA (1981)
RAYONNEMENT GLOBAL
RAYONNEMENT GLOBAL ET DIFFUS
OBSERVATIONS METEO HORAIRES
0 100 200 km
INOUCDJOUAC
KUUJUAQ
(FORT-CHIMO)
GOOSE BAY
LABRADOR
NITCHEQUON
MOOSONEE
SEPT-ILES
NORMANDIN
T.-N.
N.-B.
I.P.E.
CHARLOTTETOWN
MONTREAL
FREDERICTON
OTTAWA
KENTVILLE
HALIFAX
ONT.
E.U.
N.-E.
SABLE ISLAND

TABLEAU 1.2 - Stations limitrophes du Québec et mesurant le rayonnement solaire

CDA: Canadian Dept. of Agriculture
MRS: Meteorological Research Station
NRC: National Research Council

Station	Lat.	Long.	Alt.	Mise en service	Ray. global	Ray. diffus
Fredericton, CDA (N.B.)	45.92	66.62	40	avr. 1960	x	–
Goose Bay (T.N.)	53.30	60.37	36	nov. 1954	x	x
Moosonee (Ont.)	51.27	80.65	10	juil.1957	x	–
Ottawa, NRC (Ont.)	45.45	75.62	98	déc. 1954	x	–
Toronto, MRS (Ont.)	43.75	79.55	194	août 1967	x	x

Les données horaires de rayonnement provenant des mesures sont également disponibles sur ruban magnétique auprès d'Environnement Canada. Ce service a également préparé d'autres types de rubans contenant des données météorologiques mixées avec des données de rayonnement calculées à partir de ces dernières, et ce pour différents plans inclinés.

Les détails scientifiques concernant la méthodologie de calcul et le contenu de ces rubans — qui n'ont pas été utilisés dans la présente étude — sont contenus à la référence [1.3].

1.2 Les données météorologiques

Il existe au Québec une trentaine de stations météorologiques actuellement en service (tableau 1.3) où de nombreux paramètres importants sont mesurés ou observés. En particulier: température sèche, température humide, température du point de rosée, pression, humidité relative, ainsi que le type, le plafond, la couverture et l'opacité des nuages tels qu'observés pour chacune des quatre couches standard. On notera cependant que la couverture nuageuse n'est plus donnée couche par couche depuis 1977, mais seulement globale.

Les définitions des phénomènes observés se trouvent dans le «MANOBS» [1.4].

La plupart des stations météorologiques sont situées aux aéroports et donnent des observations vingt-quatre fois par jour. Quelques autres stations ne donnent que des observations synoptiques, c'est-à-dire huit fois par jour. En 1981, on comptait vingt-deux stations météorologiques horaires au Québec, comme il ressort du tableau 1.3. L'ensemble des stations météorologiques horaires apparaît également à la carte 1.

Les données provenant des stations météorologiques horaires sont archivées par Environnement Canada (qui les désignait par le vocable «type 1») et peuvent être obtenues sur ruban magnétique. Certains paramètres sont de plus compilés dans différentes publications régulières d'Environnement Canada. Leur description se trouve dans un guide récemment publié par ce service [1.5].

Les données météorologiques horaires ont été utilisées par différents chercheurs pour la mise au point de modèles physiques relativement complexes. En particulier, Environnement Canada a choisi le modèle MAC3 de Davies & Hay [1.3, 1.6] pour la vérification de la qualité des mesures de rayonnement, pour le remplacement des mesures manquantes par des données reconstituées, et pour l'obtention de données de rayonnement solaire pour cent stations canadiennes [1.7, 1.8].

Tableau 1.3 - Stations aériennes principales au Québec et limitrophes (relevé au 31 décembre 1980)

Station	Données			Période de service
	Horaires (24 h)	Horaires (partielles)	Synoptiques	
Québec				
1. Anticosti		x	x	1881-1956
2. Arvida		x	x	1931-1955
3. Bagotville A	x (1944-)	x	x	1942-
4. Baie Comeau A	x (1965-)	x	x	1947-
5. Bird Rocks		x	x	1881-1934
6. Blanc-Sablon		x	x	1969-
7. Border A		x	x	1965-1979*
8. Cache Lake		x	x	1951-1960
9. Cape Hopes Advance		x	x	1928-1971
10. Cape Whittle		x	x	1963-1968
11. Chapais	x	x		1962-1971
12. Charlevoix		x		1962-1969
13. Chibougamau	x	x (1936-51)	x	1971-
14. Clarke City		x	x	1936-1947
15. Dolbeau		x	x	1930-1958
16. Doucet		x	x	1922-1939
17. Fame Point		x	x	1928-1944
18. Father Point		x	x	1873-1951
19. Forestville A		x		1968-1969
20. Fort-Chimo A	x (1955-)	x	x	1917-
21. Fort George		x	x	1932-1944
22. Gagnon A		x		1965-
23. Gaspé A	x (1977-)	x	x (1977-)	1965-
24. Grindstone Island	x (1968-)	x	x	1890-
25. Harrington Harbour		x	x	1911-1978
26. Havre St-Pierre A		x		1967-1978

Station	Données			Période de service
	Horaires (24 h)	Horaires (partielles)	Synoptiques	
(suite)				
27. Iles de la Madeleine		x		1978-
28. Indian House Lake		x	x	1944-1965
29. Inoucdjouac	x(1976-)	x	x	1981-
30. Koartak		x	x	1971-
31. Lac Eon	x		x	1954-1977*
32. La Grande Rivière A	x		x	1976-
33. Manicouagan A	x(1967-68)	x	x	1971-1971
34. Maniwaki		x	x(1953-)	1943-
35. Manuan Lake		x	x	1942-1961
36. Matagami A	x(1973-80)	x	x	1973-
37. Mecatina		x	x	1943-1952
38. Mégantic A	x		x	1939-1962
39. Mingan		x	x(1943-50)	1943-50, 1978-
40. Mont-Joli A	x(1945-)	x	x	1943-
41. Montréal Dorval A	x		x	1941-
42. Montréal Mc Gill		x	x	1871-1965
43. Montréal Mirabel A	x			1975-
44. Natashquan		x	x	1936-
45. Nitchequon	x(1958-)	x	x	1942-
46. Parent		x	x	1943-1978*
47. Percé		x		1936-1951
48. Port Menier		x	x	1929-1932, 1961-
49. Poste la Baleine A	x(1957-)	x	x	1975-
50. Québec		x	x	1871-1953
51. Québec A	x		x	1943-
52. Rivière au Renard		x	x	1958-1977
53. Rivière du Loup	x		x	1965-1980 *
54. Roberval A	x		x	1957-
55. Rouyn A	x(1975-)	x		1949-
56. Ste-Agathe des Monts	x(1966-)	x	x	1899-1905, 1965-
57. St-Félicien		x	x	1938-1953
58. St-Hubert A	x(1938-)	x	x	1928-
59. St-Johns A		x	x	1941-1945

Station	Données			Période de service
	Horaires (24 h)	Horaires (partielles)	Synoptiques	
(suite)				
60. Sanmaur		x	x	1930-1939
61. Schefferville (Knob Lake)	x		x	1948-
62. Sept-Iles	x		x	1944-
63. Sherbrooke		x	x	1904-1955
64. Sherbrooke A	x		x	1962-
65. Trois-Rivières A		x		1963-1977
66. Valcartier A		x		1978-
67. Val d'Or	x		x	1949-
Ontario				
Earlton A	x		x	1938-1980
Moosonee		x	x	1932-
North Bay A	x		x	1939-
Ottawa		x	x	1872-1935
Ottawa A	x		x	1938-
Ottawa Exp. Farm		x	x	1890-99, 1935-52
Ottawa Rockliffe A	x		x	1942-1964
Petawawa A	x (1971)	x	x	1969-
Nouveau-Brunswick				
Charlo A	x		x	1966-
Terre-Neuve (Labrador)				
Churchill Falls A	x		x	1968-
Goose A	x		x	1942-
Wabush Lake A	x		x	1960-

Note (*) Remplacé ensuite par une station automatique.

1.3 Les données d'insolation

Contrairement à d'autres pays (comme les États-Unis) ou à d'autres provinces canadiennes, le Québec compte beaucoup plus de stations mesurant la durée d'insolation (près de 90) que de stations météorologiques (une trentaine).

La durée d'insolation est définie comme le nombre d'heures pendant lequel le disque solaire est visible dans le ciel, et son rayonnement suffisant pour être enregistré par un héliographe. Le réseau canadien a la particularité de fournir des données horaires d'insolation, alors que de nombreux pays se contentent de publier des données sur une base journalière ou bi-journalière (avant-midi/après-midi).

Les tableaux 1.4 à 1.6 fournissent respectivement la liste des stations actuellement en service au Québec et ayant accumulé au moins dix ans de données au 31 décembre 1981, des stations ayant accumulé au moins six ans de données mais pas nécessairement en service, et des stations mises en service depuis 1976.

Malgré la densité importante de ce réseau, il ne peut pas être considéré comme concurrent du réseau météorologique avec lequel il est possible de reconstituer des données horaires de rayonnement. La relation physique qui existe entre la présence du disque solaire (décelée par l'héliographe) et la valeur du rayonnement qui parvient au sol, ne devient en effet statistiquement significative que pour des périodes de temps suffisantes, surtout en ce qui concerne le rayonnement diffus qui peut varier dans des proportions considérables même si l'insolation mesurée est nulle.

Ainsi, bien qu'on dispose de relevés horaires d'insolation, la plupart des modèles utilisant ce paramètre pour calculer le rayonnement incident sont basés sur des périodes décadaires (moyennes de 8 à 11 jours selon les mois) ou mensuelles (moyennes de 28 à 31 jours).

Des «normales» d'insolation ont été publiées par Environnement Canada [1.9], ainsi que par le Service de Météorologie du Québec sous la forme d'un atlas de l'insolation pour le Québec méridional [1.10]. Cet atlas a été constitué à partir de données d'insolation «démasquées» c'est-à-dire corrigées pour tenir compte des masques naturels dûs au relief environnant. Ces données démasquées n'étant pas disponibles pour toutes les stations envisagées dans la présente étude, seules les données publiées par Environnement Canada [1.9] ont été considérées.

1.4 Disponibilité des données sur ruban magnétique

Toutes les données mesurées provenant du réseau d'Environnement Canada peuvent être obtenues sur ruban magnétique du Service de l'Environnement Atmosphérique, et dans certains cas, au Service de Météorologie du Québec. Cependant, ces fichiers de données sont écrits suivant un format destiné à un archivage complet dans le minimum d'espace, et non pas au traitement informatique efficace.

Tableau 1.4 - Stations d'insolation en service au 31 décembre 1980 et ayant accumulé au moins 10 ans de données.

	Station	En service depuis
1.	Albanel	1922
2.	Amos	1963
3.	Armagh Station	1969
4.	Barrage Témiscamingue	1968
5.	Berthierville	1933
6.	Blanc Sablon A	1965
7.	Border	1967
8.	Cap Seize	1967
9.	Chibougamau A	1971
10.	Disraéli	1969
11.	Duchesnay	1938
12.	Eastmain	1962
13.	Ferme Neuve	1964
14.	Forestville	1963
15.	Forêt Montmorency	1965
16.	Fort Chimo A (Kuujjuaq)	1969
17.	Gagnon A	1968
18.	Grandes Bergeronnes	1951
19.	Grindstone Island	1969
20.	Harrington Forest	1964
21.	Inoucdjouac (Port Harrison)	1937
22.	Koartak	1971
23.	Lac-aux-Sables	1969
24.	Lac Ste-Croix	1958
25.	La Pocatière (Ste-Anne de)	1913
26.	L'Assomption	1930
27.	Maniwaki	1962
28.	Maple Leaf East	1965
29.	Mont-Joli A	1970
30.	Montréal Dorval A	1969
31.	Montréal Jean-Brébeuf	1958
32.	Montréal Mc Gill	1881
33.	Natashquan	1969
34.	New Richmond	1964
35.	Nitchequon	1967
36.	Normandin	1936
37.	Notre-Dame du Lac	1969
38.	Ouimet	1963
39.	Peribonca	1951
40.	Poste de la Baleine A (Great Whale)	1970
41.	Poularies	1969
42.	Québec A (Ancienne Lorette)	1953
43.	Rimouski	1953
44.	Rivière au Tonnerre	1965

Tableau 1.4 (suite)

	Station	En service depuis
45.	Ste-Agathe-des-Monts	1966
46.	Ste-Anne de Bellevue (Mc Donald College)	1956
47.	St-Augustin	1964
48.	Ste-Clothilde	1940
49.	St-Coeur de Marie	1963
50.	St-François d'Orléans	1969
51.	Ste-Germaine	1963
52.	St-Hyacinthe	1964
53.	St-Isidore d'Auckland	1965
54.	St-Ludger	1965
55.	St-Michel des Saints	1969
56.	Sawyerville nord	1965
57.	Schefferville A (Knob Lake)	1954
58.	Senneterre	1969
59.	Sept-Iles A	1963
60.	Shawville	1965
61.	Sutton Jonction	1969
62.	Val d'Or A	1969
63.	Vallée Jonction	1965
64.	Victoriaville	1952
65.	Ville-Marie	1970
66.	West Ditton	1965

Tableau 1.5 - Stations d'insolation ayant accumulé au moins 5 ans de données au 31 décembre 1980

	Station	Période de service
1.	Abbotsford	1931-36
2.	Arthabaska	1969-74
3.	Baie Comeau	1966-
4.	Barrière Louvicourt	1969-74
5.	Berry Mountain	1969-72
6.	Caplan	1952-73
7.	Cap Rouge	1911-40
8.	Causapscal Recherches	1951-73
9.	Chicoutimi	1976-
10.	Courville	1963-71
11.	Deception Bay	1964-73
12.	Farnham	1918-41
13.	Fort George	1932-69
14.	Hébertville	1951-58
15.	Iberville	1963-78
16.	Lac Caché	1963-73
17.	Lac Humqui	1972-
18.	Lac Minogami	1970-78
19.	La Ferme	1919-36
20.	La Grande Rivière A	1976-
21.	Laprairie	1963-73
22.	Lennoxville	1915-79
23.	Matagami	1964-74
24.	Matagami A	1974-
25.	Matamek	1975-
26.	Mistassini	1915-22
27.	Mont Logan	1963-75
28.	Montréal Jardin bot.	1953-74
29.	Montréal Mirabel A	1976-
30.	Oskelaneo	1963-74
31.	Parent	1970-78
32.	Parke	1963-68
33.	Petite Rivière St-François	1972-
34.	Port Menier	1976-
35.	Québec	1902-53
36.	Rapide Blanc	1967-75
37.	Rigaud	1963-68
38.	Rivière au Renard	1966-77
39.	Rivière aux Rats	1963-74
40.	Romieu Sud	1966-71
41.	St-Alexis de Matapédia	1972-
42.	St-Ambroise	1957-72
43.	St-Cassien des Caps	1972-
44.	St-Eleuthère	1973-
45.	St-Octave de l'Avenir	1966-70
46.	Sherbrooke	1906-72

Tableau 1.6 - Stations d'insolation mises en service depuis 1977

	Station	En service depuis
1.	Baie Comeau A	Juin 1978
2.	Champlain	février 1981
3.	Gaspé A	septembre 1977
4.	Lauzon	décembre 1978
5.	Nicolet	mai 1978
6.	Roberval A	juin 1978
7.	Sabrevois	mai 1979
8.	Ste-Béatrix	septembre 1977
9.	St-Mathieu	juin 1978
10.	Sherbrooke A	mai 1978
11.	Valcartier	février 1978

De plus, les données météorologiques sont rapportées ponctuellement toutes les heures en temps standard alors que les données de rayonnement et d'insolation sont intégrées sur une période de 60 minutes sur la base du Temps Solaire Vrai (ou Local Apparent Time).

Enfin, parmi toutes les données météorologiques horaires mesurées ou observées, un certain nombre ne sont pas vraiment utiles aux concepteurs et chercheurs en génie climatique ou solaire.

Dans ces conditions, une étude récente [1.11] a permis aux auteurs du présent rapport de constituer une banque de données particulièrement destinée aux utilisateurs de programmes de simulation thermique horaire sur ordinateur. Les formats séquentiels adoptés sur ces rubans, le tri et le recalage des données météorologiques en Temps Solaire Vrai, ainsi que le mixage de ces données avec celles de rayonnement et d'insolation, autorisent maintenant un traitement beaucoup plus sûr et rapide des informations nécessaires à l'utilisation des programmes de simulation horaire. Il existe déjà de nombreux programmes de ce type sur le marché ou dans les institutions publiques [1.12 à 1.14].

Des fichiers sur ruban contenant six à dix ans de données horaires ont été fournis suivant ce format au Service de Météorologie du Québec pour les stations de Montréal, Sept-Iles, Goose Bay et Ottawa. Un autre fichier existe pour Normandin, mais sans données météorologiques (puisqu'elles n'y sont pas mesurées). Ces fichiers sont disponibles pour les intervenants québécois impliqués dans la recherche.

Tous les détails concernant les transformations effectuées à partir des fichiers originaux et le contenu des nouveaux rubans sont décrits à la référence [1.11]. Le tableau 1.7 résume les principales informations concernant le format du contenu de ces rubans. Ceux-ci ont été utilisés dans le cadre de la présente recherche pour évaluer les modèles décrits aux chapitres 3 et 4.

D'autres types de rubans contenant des données de rayonnement reconstituées à partir des données météorologiques horaires sont disponibles auprès d'Environnement Canada (voir paragraphe 1.1).

1.5 Terminologie et unités

Dans tout ce travail, le terme «rayonnement» désigne de façon générale le flux radiatif contenu essentiellement entre les longueurs d'onde 0.3 et 3 μm, et reçu au niveau du sol par une surface horizontale ou non.

Le terme «radiation solaire» n'est pas employé ici car il fait référence dans son acceptation française à une valeur spectrale, de longueur d'onde déterminée [1.15].

Le terme «irradiance» est utilisé pour décrire la quantité d'énergie rayonnante reçue pendant une période très courte (en principe, une seconde).

TABLEAU 1.7 Format des rubans magnétiques

ELÉMENT	COLONNE	CODE	FORMAT	UNITÉS	NO. ÉLÉMENT	MONTRÉAL	GOOSE BAY	SEPT-ILES	OTTAWA	NORMANDIN
Année	1-2	73-78	I2			X	X	X	X	X
Mois	3-4	1-12	I2			X	X	X	X	X
Jour	5-6	1-31	I2			X	X	X	X	X
Heure	7-11	0.5-23.5	F5.2	TSV		X	X	X	X	X
Plafond	12-19	-8888.88 ILLIMITE	F8.2	km	71	X	X	X	X	
Visibilité	20-27	-8888.88	F8.2	km	72	X	X	X	X	
Précipitation ou Phénomène obscurcissant	28	1= OUI 0= NON	I1		83	X	X	X	X	
Pression au niveau de la mer	29-36		F8.2	millibars	73	X	X	X	X	
Température du point de rosée	37-44		F8.2	°C	74	X	X	X	X	
Pression barométrique	45-52		F8.2	millibars	77	X	X	X	X	
Température sèche	53-60		F8.2	°C	78	X	X	X	X	
Température humide	61-68		F8.2	°C	79	X	X	X	X	
Humidité relative	69-76		F8.2	%	80	X	X	X	X	
Opacité totale	77-84		F8.2	en 1/10 de 0-1	81	X	X	X	X	
Couverture nuageuse totale	85-92		F8.2	en 1/10 de 0-1	82	X	X	X	X	
Opacité 1e couche	93-100		F8.2	en 1/10 de 0-1	107	X	X	X	X	
Couverture 1e couche	101-108		F8.2	en 1/10 de 0-1	108	X	X	X	X	
Type 1e couche	109-110		I2		109	X	X	X	X	
Aucun		0								
Altocumulus		1								
Altocumulus castellanus		2								
Altostratus		3								
Cirrocumulus		4								
Cirrostratus		5								
Cirrus		6								
Cumulonimbus		7								
Cumulus		8								
Cumulus Fractus		9								
Stratus Fractus		10								
Towering Cumulus		11								
Nimbostratus		12								
Stratocumulus		13								
Stratus		14								
Brouillard		15								
Obstruction autre que brouillard		16								
Inconnu		99								

TABLEAU 1.7 Format des rubans magnétiques (suite)

ÉLÉMENT	COLONNE	CODE	FORMAT	UNITÉS	NO. ÉLÉMENT	MONTRÉAL	GOOSE BAY	SEPT-ILES	OTTAWA	NORMANDIN
Plafond 1e couche	111-118	-8888.88 ILLIMITÉ	F8.2	km	110	X	X	X	X	
Opacité 2e couche	119-126		F8.2	en 1/10 de 0-1	111	X	X	X	X	
Couverture 2e couche	127-134		F8.2	en 1/10 de 0-1	112	X	X	X	X	
Type 2e couche	135-136		I2		113	X	X	X	X	
Plafond 2e couche	137-144	-8888.88 ILLIMITÉ	F8.2	km	114	X	X	X	X	
Opacité 3e couche	145-152		F8.2	en 1/10 de 0-1	115	X	X	X	X	
Couverture 3e couche	153-160		F8.2	en 1/10 de 0-1	116	X	X	X	X	
Type 3e couche	161-162		I2		117	X	X	X	X	
Plafond 3e couche	163-170	-8888.88 ILLIMITÉ	F8.2	km	118	X	X	X	X	
Opacité 4e couche	171-178		F8.2	en 1/10 de 0-1	119	X	X	X	X	
Couverture 4e couche	179-186		F8.2	en 1/10 de 0-1	120	X	X	X	X	
Type 4e couche	187-188		I2		121	X	X	X	X	
Plafond 4e couche	189-196	-8888.88 ILLIMITÉ	F8.2	km	122	X	X	X	X	
Rayonnement global (RF1)	197-204		F8.2	MJ/h-m²	61	X	X	X	X	*
Ensoleillement	205-212		F8.2	en 1/10 de 0-1	133	X	X	X	X	*
Vitesse du vent	213-220		F8.2	km/h	76	X	X	X	X	
Direction du vent	221-228		F8.2	10 deg.	156	X	X	X	X	
Rayonnement diffus (RF2)	229-236		F8.2	MJ/h-m²	62	X	X			

NOTE: Si la valeur météo est inconnue ou manquante, le chiffre -9999.99 lui est substituée.

* Sur Normandin, ces éléments se retrouvent sur les colonnes 12@27.

Le terme «irradiation» désignera par contre une quantité d'énergie rayonnante reçue pendant une période assez longue (une journée, un mois, etc.)

Les unités employées seront celles du S.I. ou leurs multiples: $W \cdot m^{-2}$ pour une irradiance, $kJ \cdot m^{-2}$ ou $MJ \cdot m^{-2}$ pour une irradiation, de manière à se conformer à l'usage actuel d'Environnement Canada. Il convient cependant de noter que l'irradiation peut également s'exprimer en $Wh \cdot m^{-2}$, comme le recommandent certains auteurs ou organismes (voir par exemple [1.16]).

Le terme «durée d'insolation» est équivalent à «durée d'ensoleillement» ou «heures de soleil brillant». Pour des raisons pratiques évidentes, l'unité employée est l'heure.

Le rayonnement «direct» est défini comme le flux d'énergie provenant en ligne directe du soleil, lorsque son disque est visible depuis le sol.

Le rayonnement «diffus» se rapporte au flux d'énergie provenant de toute la voûte céleste et des nuages.

Le rayonnement «global» est la somme des composantes directe et diffuse.

Pour les chercheurs désireux d'approfondir la question des phénomènes physiques et atmosphériques mis en jeu, des méthodes de mesure et d'estimation du rayonnement, il est conseillé de se référer à des ouvrages très spécialisés dont la teneur dépasse le cadre de ce travail ([1.17] à [1.21]). Les principes physiques de base et les équations astronomiques ne seront rappelés ici qu'en fonction des besoins de l'analyse. Pour une meilleure compréhension d'ensemble, il est plutôt recommandé de consulter des ouvrages moins spécialisés (par exemple, [1.15] et [1.22] à [1.27]).

1.6 Références

1.1- Service de l'Environnement Atmosphérique-depuis 1960-Sommaire du rayonnement mensuel. Environnement Canada, Downsview, Ontario.

1.2- Phillips D.W. & Aston D., 1980. Données sur le rayonnement solaire au Canada. CLI 2-80, Environnement Canada, Downsview, Ontario.

1.3- Canadian Climate Center, 1980. Define, develop and establish a merged solar and meteorological computer data base. Rpt. #80-8 prepared by MacLaren et al. Environnement Canada, Downsview, Ontario.

1.4- Service de l'Environnement Atmosphérique- MANOBS (Manuel de l'Observateur). Volume réédité et remis à jour périodiquement. Environnement Canada, Downsview, Ontario.

1.5- Phillips D.W., ed., 1979- Guide des sources des données climatiques du Service de l'Environnement Atmosphérique. Environnement Canada. Downsview, Ontario.

1.6- Davies J.A. & Hay J.E., 1980- Calculation of the solar radiation incident on a horizontal surface. Proc. First Canadian solar radiation workshop, Toronto,1978 Supply and Services Canada.

1.7- Hooper F.C. et al., 1979. The Canadian solar radiation data base- ASHRAE Trans. 85, 2

1.8- McKay D. & Won T.K., 1979. Expansion of the Canadian solar radiation data base by estimation. Proc. SESCI Conf., Charlottetown, P.E.I.

1.9- Yorke B.J. & Kendall G.R., 1972- Daily bright sunshine normals. CLI 6-72, AES, Downsview, Ontario.

1.10- Gariépy J., Calvet C. & Leduc R., 1981. L'ensoleillement au Québec. M.P.-60. Service de la Météorologie, Québec.

1.11- Chatigny R., Galanis N., Gueymard C. & Labelle D., 1981- Mise sous forme accessible des fichiers de données atmosphériques horaires en vue de leur utilisation efficace sur ordinateur- Rapport préparé pour la Direction des Énergies Nouvelles, Québec.

1.12- An., 1980. Analysis methods for Solar Heating and Cooling Applications- Passive and active systems- SP-35-232R, SERI, Golden, CO.

1.13- An., 1979. Solar passive building design computer programs: a brief survey with comments- New England Solar Energy Association, Brattleboro, VT.

1.14- Lee K. & Masloff J., 1979- Energy oriented computer programs for the design and monitoring of buildings. 2 vol. EDRC, Newtonville, MA.

1.15- Perrin de Brichambaut C. & Lamboley G., 1974. Le rayonnement solaire au sol et ses mesures. Cahiers AFEDES no. 1, Paris, France.

1.16- Palz W., ed., 1979- Atlas européen du rayonnement solaire- Commission des Communautés Européennes, Luxembourg.

1.17- Coulson K.L., 1975- Solar and terrestrial radiation. Academic Press, New York, 322 p.

1.18- Kondratyev K.Y., 1969- Radiation in the atmosphere. Academic Press, New York, 912 p.

1.19- Paltrige G.W. & Platt C.M.R., 1976. Radiative processes in meteorology and climatology. Elsevier, Amsterdam 318 p.

1.20- Robinson N. ed., 1966. Solar radiation, Elsevier, Amsterdam, 347 p.

1.21- Hay J.E. & Won T.K., eds., 1980- Proceedings of the first solar radiation workshop. (Toronto, 1978)- Supply and Services Canada, Ottawa, 166 p.

1.22- Watt Eng., 1978- On the nature and distribution of solar radiation. USDOE HCP/T2552-01, Superintendent of Documents, Washington, D.C.

1.23- Kreider J.F. & Kreith F., 1981. Solar energy handbook, McGraw-Hill, New York, 1120 p.

1.24- Sfeir A.A. & Guarracino G., 1981- Ingénierie des systèmes solaires - Technique & Documentation, Paris, 266 p.

1.25- Duffie J.A. & Beckman W.A., 1980- Solar engineering of thermal processes- Wiley, New York, 762 p.

1.26- Gueymard C.& Bilgen E., 1978 - Elements d'analyse du rayonnement solaire et son estimation au Québec. Rpt. technique EP-78-R24, École Polytechnique de Montréal.

1.27- International Energy Agency, 1980 - An introduction to meteorological measurements and data handling for solar energy applications. DOE/ER-0084, NTIS, Springfield, VA.

CHAPITRE 2 - MÉTHODE DE CLASSIFICATION DES MODÈLES

2.1 Introduction

De nombreux modèles de calcul du rayonnement solaire ont été proposés dans la littérature. Leur recensement complet est devenu quasi impossible, à mesure que leur nécessité a entraîné dans tous les pays l'apparition accélérée de nouveaux développements aux modèles de base, pour répondre à des usages de plus en plus diversifiés. Il est donc devenu nécessaire de pouvoir guider le choix de l'utilisateur potentiel face à ce nombre important de modèles, d'une part à cause de la variété de leurs niveaux de complexité (donc de temps de calcul) et de précision, et d'autre part à cause des risques d'erreurs associés au choix d'un modèle ne convenant pas au type d'application à laquelle il est supposé fournir des valeurs d'entrée. En dehors de la classification très restreinte proposée par Davies [2.1], aucune tentative méthodologique ne semble avoir été proposée dans la littérature.

Dans ces conditions, le présent chapitre a pour but de faire le point de manière synthétique sur les possibilités de classification de ces modèles, et de définir les critères de choix possibles. La discussion et le classement porteront d'abord sur les grands types méthodologiques mis en jeu dans les modèles, puis sur les différents types de données utilisables selon les pays et sur les différents types de réduction temporelle de ces données. Pour la plupart des classes ainsi définies, les applications les plus importantes seront décrites.

2.2 Classement suivant le type de méthodologie

La première possibilité de classification consiste à distinguer les différents modèles suivant la méthode employée pour obtenir les résultats. Dans cette optique, on peut considérer que l'essence d'un modèle est de «transformer» des données (astrophysiques, météorologiques ou autres) en valeurs de rayonnement solaire utilisables en vue d'une application particulière. Dans ce paragraphe, on cherche donc à différencier les types de ces «transformateurs de données» existants. Par exemple, on peut proposer les catégories suivantes:

(i) Les modèles théoriques, faisant largement appel aux théories de la transmission et de la diffusion du rayonnement (par les molécules, les aérosols, les gouttelettes ou les cristaux formant les nuages). Ces calculs doivent être faits pour une hauteur solaire donnée, pour de nombreuses couches atmosphériques,pour chaque longueur d'onde du spectre, et sont donc d'une telle complexité qu'ils nécessitent de très longs temps de calcul sur ordinateur. De plus, ils ne permettent que la modélisation de conditions atmosphériques idéales (par exemple: ciel clair, ou nuages de type, d'épaisseur et de hauteur bien définis). On peut placer dans cette catégorie le modèle de

base développé par Braslau et Dave [2.2] qui nécessite jusqu'à vingt heures de temps CPU sur ordinateur IBM 360 pour 161 couches verticales d'une atmosphère modèle, avec 83 bandes spectrales mais aucun nuage. Le programme LOWTRAN développé et distribué par l'Air Force Geophysics Laboratory [2.3] peut également entrer dans cette catégorie, bien qu'il soit nettement plus rapide que le précédent et donc accessible à un plus grand nombre de chercheurs.

(ii) Les modèles physiques qui décrivent les phénomènes de transmission du rayonnement de manière nettement simplifiée par rapport aux précédents. Ils partent de données réelles (mesurables ou observables) décrivant l'état de l'atmosphère à la station choisie. Le nombre de couches verticales considérées est limité (3 à 9) et chaque couche correspond sensiblement à un type de nuage fréquent à l'altitude correspondante. En général, le nombre de bandes spectrales considérées est également limité. L'effet de transmission et d'absorption des nuages est incorporé sous une forme paramétrisée. Tout cela permet généralement de ramener le temps de calcul sur ordinateur à une durée de l'ordre de quelques minutes CPU. Les applications de ce type de modèles sont nombreuses. On citera par exemple leur utilisation possible au sein des grands modèles atmosphériques de circulation générale, de pollution par les aérosols, de climatologie globable ou de prévision numérique du temps; les modèles peuvent alors ne considérer qu'un aspect particulier de la transmission du rayonnement dans l'atmosphère. Les références [2.4] à [2.7] sont des exemples de ce type d'application. On peut également faire entrer dans cette catégorie les modèles quatre couches permettant de calculer séparément l'irradiance directe et diffuse au moyen de fonctions statistiques décrivant la transmittance globale de chaque type de nuages. Ces modèles [2.8] à [2.11] ont fait l'objet d'investigations poussées et de tests de comparaison par rapport aux données de rayonnement mesurées par Environnement Canada [2.1], [2.12].

(iii) Les modèles empiriques où l'on cherche une relation statistique obtenue par corrélation entre le rayonnement— variable dépendante— et des paramètres atmosphériques ou astrophysiques, par exemple: durée d'insolation, couverture nuageuse, opacité nuageuse, humidité relative, visibilité, hauteur du soleil, choisis à priori— variables indépendantes— pour leur intérêt et leur accessibilité. Les modèles de ce type abondent dans la littérature depuis longtemps, par exemple [2.13] à [2.58]. Certains de ces modèles seront étudiés aux chapitres suivants. Beaucoup moins complexes que ceux du type (i) et (ii), ces modèles nécessitent rarement l'ordinateur. Les plus simples ne fournissent que des moyennes mensuelles d'énergie incidente et peuvent être employés à la main ou avec une calculatrice de poche. On retrouve fréquemment ce type de modèles dans de nombreux domaines: production d'énergie, architecture, hydrologie, agronomie, écologie, foresterie, géographie climatique, etc.

(iv) Les modèles stochastiques qui partent de l'étude statistique approfondie des séries de données disponibles pour en découvrir les lois probabilistes. Une fois ces lois connues, de nouvelles séries temporelles peuvent être constituées en respectant des contraintes globales (moyenne, écart-type, auto-corrélation...). Plusieurs méthodes peuvent être employées (chaînes de Markov, modèles auto-régressifs ARMA, analyse factorielle, tenseurs de transition...) et permettent de constituer rapidement des banques de données de rayonnement incident. Parmi la littérature consacrée à ce sujet, on peut citer par exemple les références [2.59] à [2.64]. L'application certainement la plus prometteuse concerne la reconstitution des variations de très courte période (de l'ordre de la minute) du rayonnement incident à partir de données moyennes (horaires par exemple). Une telle étude s'avère essentielle pour pouvoir simuler la réponse transitoire de capteurs solaires, et en particulier de capteurs à concentration (sujets au passage intermittent des nuages). D'ailleurs, les mêmes méthodes stochastiques peuvent être appliquées à l'analyse des performances des systèmes de chauffage solaire ou de production d'énergie à haute température [2.65] à [2.69]. Mentionnons enfin que le modèle statistique de Randall et Whitson [2.70] peut être classé dans cette catégorie. Ce modèle a servi à générer des données reconstituées d'irradiance directe normale pour les "Années Météorologiques Typiques" (TMY).

(v) Les modèles faisant appel aux images satellite. Comme la précédente, cette catégorie est maintenant en plein développement et devrait permettre rapidement des progrès considérables en matière de prévision régionale et mondiale de l'énergie solaire incidente. Les modèles mathématiques utilisés peuvent appartenir aux catégories définies précédemment. Il semblait cependant justifié d'en faire une classe distincte du fait des techniques très spéciales et appareillages sophistiqués mis en jeu pour analyser les images, et de leur manque d'accessibilité aux non-spécialistes. Sur ce sujet, on consultera par exemple la référence [2.71].

On peut reprocher à la classification qui vient d'être esquissée son caractère essentiellement académique. De plus, elle peut être entachée d'une certaine subjectivité dans la mesure où certains modèles peuvent se situer à la limite entre deux catégories. Par exemple, on peut considérer que le modèle de Won [2.72] se trouve à cheval entre les classes (ii) et (iii). Pour ces raisons, deux autres principes de classification à caractère pratique vont être proposés dans la suite.

2.3 Classement suivant le type de données

Une revue approfondie des publications spécialisées provenant de nombreux pays montre qu'un nombre limité de variables météorologiques ou climatiques est utilisable pour opérer les modèles de calcul du rayonnement incident. D'autre part, les mesures ou observations faites par

les réseaux météorologiques peuvent varier d'un pays à l'autre, soit au niveau de la prise de données brutes, soit au niveau de la publication de données compilées.

Les principales caractéristiques des données fournies par les réseaux d'Environnement Canada ont été abordées au chapitre 1. Il en ressort que trois types de données bien différents sont utilisables dans un processus d'estimation des composantes du rayonnement solaire:

A- Les données météorologiques, provenant d'une trentaine de stations au Québec et alimentant des modèles du type de ceux analysés au chapitre 3.

B- Les données d'insolation, qui concernent près d'une centaine de stations au Québec et les modèles abordés aux chapitres 5 et 6.

C- Les données de rayonnement global sur un plan horizontal, disponibles à six stations au Québec, et utilisables pour estimer la part de rayonnement diffus par rapport au rayonnement direct, comme le proposent les modèles abordés au chapitre 4.

2.4 Classement suivant la réduction temporelle des données

Dans la suite, on utilisera l'expression réduction temporelle pour décrire la période de temps à laquelle se rapportent les données utilisées (input) ou les résultats calculés (output) par un modèle, quel que soit le type des données nécessaires. Par principe, un modèle sera associé à la plus faible réduction s'il peut évaluer le rayonnement incident en valeur instantanée. La plus forte réduction correspondra au calcul d'une valeur moyenne sur une période très longue (un mois par exemple). Ce principe de réduction est souvent méconnu de nombreux utilisateurs de données de rayonnement mesurées ou calculées. IL existe même une certaine confusion à ce niveau dans la littérature, ce qui a pour effet de fausser les comparaisons entre modèles utilisant des données réduites de façon différente.

La première distinction fondamentale doit être faite entre les valeurs particulières et les valeurs moyennes d'un même paramètre. Étant donné la forte variabilité des phénomènes atmosphériques contrôlant la transmission du rayonnement, les modèles physiques (tels que définis précédemment) sont plus à même de générer des valeurs particulières de rayonnement— sur une base horaire en principe— que les modèles empiriques qui reposent, en général, sur des données statistiques moyennes et ne peuvent alors générer que des valeurs moyennes de rayonnement.

Une autre distinction importante doit être faite entre les valeurs horaires et les valeurs journalières, pour des raisons pratiques évidentes. De plus, une unité de temps fréquemment utilisée par convention est le mois calendaire.

Les trois durées conventionnelles de base précédemment définies (heure, jour, mois) jointes aux deux types de valeurs possibles (particulières et moyennes), permettent de classifier les différentes possibilités de résolution temporelle.

(1) Durée horaire

(1 1) Heure particulière (par exemple le 15 mai 1982 entre 11 et 12 h).

(1 2) Heure moyenne d'un jour moyen (soit la moyenne des périodes 11-12h pour mai 1982).

(1 3) Heure moyenne à long terme pour un mois (par exemple la moyenne des périodes 11-12h prises sur l'ensemble des mois de mai de 1965 à 1982).

(2) Durée journalière

(2 1) Jour particulier (par exemple le 15 mai 1982).

(2 2) Jour moyen d'un mois particulier (soit la moyenne des jours du mois de mai 1982 par exemple).

(2 3) Jour moyen à long terme pour un mois (par exemple la moyenne des valeurs journalières de mai prise sur l'ensemble des mois de mai entre 1965 et 1982).

Finalement, cette classification— qui caractérise l'output du modèle, donc le type d'application qui s'y adapte le mieux— peut être croisée avec la classification par type de données, qui caractérise l'input du modèle, donc de quelles informations il dépend. On obtient alors 18 classes. Mais comme certains modèles utilisent à la fois des données météorologiques et des données d'insolation, on aboutit à l'introduction d'une quatrième catégorie, qui, par analogie avec les notations du paragraphe 2.3, sera désignée «AB», ce qui porte le nombre total de classes à 24, tel qu'il apparaît au tableau 2.1. Chaque classe peut recevoir une désignation alphanumérique pour simplifier l'utilisation de la grille. Par exemple, la classe A11 correspond aux modèles calculant des valeurs horaires particulières de rayonnement à partir de données météorologiques. De façon à faciliter la discussion qui va suivre, certaines classes du tableau 2.1 ont été remplies. Les modèles qui y apparaissent ont généralement été mis au point en Amérique du Nord et ont été choisis parmi les références [2.10] à [2.85] dans une littérature abondante pour illustrer l'intérêt du classement préconisé.

2.5 Discussion

En gardant à l'esprit qu'il est parfois difficile de pouvoir définir avec exactitude à quelle classe appartient un modèle du fait du manque de précision des publications sur ce point, on remarque au tableau 2.1 qu'il subsiste plusieurs classes non remplies. En particulier, les conditions correspondant à la deuxième colonne (numérotée 12) ne semblent pas avoir été investiguées,

Cependant la classification par réduction temporelle croissante qui a été adoptée permet de faire ressortir une caractéristique commune à tous les modèles. En effet, ceux-ci obéissent à une loi qui se traduit

TABLEAU 2.1 - Grille générale pour la classification des modèles de calcul du rayonnement solaire incident

Résolution / Données	Heure			Jour		
	11 Particulière	12 Moyenne pour un jour moyen	13 Moyenne long terme	21 Particulier	22 Moyen d'un mois particulier	23 Moyen long terme
A Météo	A11 MAC3 [2.11] Won [2.72] ASHRAE [2.73] Goldberg et Klein 1 [2.20]	A12	Whillier [2.80] Liu et Jordan [2.81] Collares-Pereira et Rabl [2.82] (via colonne 23, voir texte)	A21 Goldberg et Klein 2 [2.20] Stanhill 1 [2.52]	A22 Bennett 1 [2.14] Mateer [2.31]	A23
AB Météo et Insolation	AB11 NOAA-SOLMET [2.74] CLS [2.10] MCLS [2.1]	AB12		AB21 Bennett [2.15]	AB22 Bennett 2 [2.14] Swartman et Ogunlade 1 [2.54] Sabbagh et al. [2.49] Reddy [2.47]	AB23
B Insolation	B11 Morris et Lawrence [2.34] Paulin [2.75] Smith [2.51]	B12		B21 Gueymard et al. [2.21] Stanhill 2 [2.52]	B22 Gariépy [2.19] Hay [2.24] Titus et Truhlar [2.55] Swartman et Ogunlade 2 [2.54] Rietveld [2.48]	B23 Iqbal [2.25]
C Rayonnement global	C11 Bugler [2.76] Iqbal [2.85] TRNSYS [2.78] WATSUN [2.79] Boes [2.94]	C12	C13 Hay [2.93]	C21 Stanhill 3 [2.52] Tuller 1 [2.83]	C22 Tuller [2.83] Page [2.38]	C23 Deris [2.84] Iqbal [2.85]

concrètement par la capacité d'un modèle classé dans une colonne (11 par exemple) de générer des données pouvant être réduites par la suite. Le résultat obtenu après cette opération supplémentaire est alors de même type (mais pas nécessairement de même précision) que celui produit par un modèle plus simple situé dans une colonne située plus à droite (21 par exemple). Ainsi, plus un modèle est situé à gauche, plus il est performant et versatile mais également plus complexe et coûteux à utiliser.

La procédure inverse (c'est-à-dire la réduction de la droite vers la gauche) est théoriquement impossible, sauf dans le cas particulier de la méthode introduite par Whillier [2.80] et reprise par Liu & Jordan [2.81] puis par Collares Pereira & Rabl [2.82]. La méthode repose sur le fait **statistique** qu'il est possible d'obtenir des valeurs horaires à long terme à partir de données journalières moyennes de rayonnement global ou diffus. Ces dernières peuvent être obtenues par tout modèle de la colonne 23. Mis à part ce cas particulièrement important par ses possibilités d'application et qui sera détaillé au chapitre 7, les modèles fournissent normalement des résultats (en output) de réduction identique aux données d'entrée (input).

L'intérêt de la classification proposée réside d'abord dans la correspondance qui existe entre certains types de modèles de calcul du rayonnement et diverses applications courantes, et ensuite dans la possibilité de choisir valablement entre les modèles d'une même classe en sachant qu'ils exigent des coûts de calcul presque identiques.

Par exemple, une majorité des nombreux modèles qui correspondent à la définition de la classe B22 du tableau 2.1 ont été proposés pour répondre à des besoins climatologiques ou agrométéorologiques. Quelques modèles des classes A11 et AB11 ont été ou sont encore utilisés au Canada (MAC3 [2.11], Won [2.72]) ou aux États-Unis (SOLMET-NOAA [2.74]) aux fins de vérification des données mesurées, et de remplacement des données manquantes ou incertaines. Les modèles du même type— et plus généralement tous ceux de la première colonne— servent également à la simulation du comportement thermique des bâtiments ou des systèmes de chauffage solaire.

Les modèles de la colonne 23 sont particulièrement adaptés à générer les valeurs moyennes à long terme nécessaires aux méthodes de design simple des systèmes de chauffage solaire (F-chart, Solar Load Radio...). D'autres méthodes de design un peu plus sophistiquées utilisent des moyennes horaires à long terme, fournies par des modèles pouvant être répertoriés à la colonne 13 (utilisabilité, ϕ chart[2.86]).

On notera que les cases C21, C22 et C23 du tableau 2.1 correspondent essentiellement aux modèles permettant le calcul de l'irradiation diffuse journalière à partir du rayonnement global. De nombreuses formulations ont été obtenues par régression statistique depuis les travaux de Liu et Jordan [2.81]. Cependant, la méthode de réduction qu'ils ont employée ne repose pas sur le calcul préliminaire de moyennes journalières ou mensuelles, mais sur un regroupement par

paliers des valeurs de fraction d'irradiation $K_T = H/H_o$. Une telle méthode nécessite donc une analyse plus approfondie avant de pouvoir être cataloguée au tableau 2.1 entre les classes C21, C22 ou C23. Les recherches subséquentes faites par différents auteurs (par exemple, [2.33], [2.38], [2.52], [2.82] à [2.85], [2.87] à [2.90]), à partir de données de nombreux pays, ne sont d'ailleurs pas toujours basées sur une procédure de réduction tout à fait identique à celle de Liu et Jordan, tout en employant des nonemclatures prêtant à confusion. Cela entraîne une difficulté de comparaison entre les modèles, puisqu'il est parfois impossible de savoir a priori si les différences constatées entre leurs résultats sont plutôt le reflet des caractéristiques climatiques propres à la région, ou celui de l'imprécision des mesures, ou encore celui de la méthode de réduction employée.

Tant qu'une étude exhaustive n'aura pas été entreprise à ce sujet, l'utilisateur de telles corrélations aura intérêt à se reporter à l'article original de Liu et Jordan [2.81], ainsi qu'aux discussions contenues dans les références [2.77, 2.82, 2.91]. De plus, les résultats du chapitre 4 permettent d'apprécier la sensibilité du modèle de Liu et Jordan (tel qu'utilisé dans le programme TRNSYS) à la méthode de réduction de données.

2.6 Conclusion

Pour répondre à la demande du nombre croissant des utilisateurs de données de rayonnement solaire— que cela soit dans le domaine énergétique ou autre— trois critères de classification des modèles de calcul du rayonnement incident ont été proposés. Deux d'entre eux permettent la constitution d'une grille de classement pratique et efficace, d'où ressort pour chaque modèle l'interaction entre le type des données d'entrée (input) à se procurer et le type de réduction temporelle des résultats (output) nécessité par l'application envisagée pour le modèle. Cette grille a été développée spécifiquement à partir des caractéristiques du réseau d'Environnement Canada, mais pourrait être éventuellement modifiée pour tenir compte des particularités des réseaux d'autres pays.
Pour certaines classes importantes de la grille illustrée au tableau 2.1, des applications pratiques ont été décrites. On peut donc recommander que les auteurs de nouveaux modèles de rayonnement indiquent explicitement à quelle classe ceux-ci appartiennent de façon à faciliter les possibilités de comparaison ultérieure avec d'autre modèles. Il est en effet logique de ne comparer entre eux que des modèles appartenant à une même classe, comme il apparaît dans les chapitres suivants.

On peut également suggérer le développement d'études d'évaluation de la précision pouvant être obtenue avec chaque type de modèle, en fonction d'abord du coût de calcul qu'il nécessite, et surtout des conditions d'application des résultats qu'il fournit. Par exemple, dans le domaine du chauffage solaire, une première étude analytique détaillée a été réalisée [2.92] et aboutit aux conclusions suivantes quant au choix de la réduction temporelle:

(i) Si la nébulosité est relativement peu variable, les réductions correspondant aux colonnes 11, 12, 21 et 22 appliquées à des valeurs atmosphériques mesurées (rayonnement incident, température, vitesse du vent, couverture nuageuse) permettent de bien prédire le rendement moyen d'un capteur solaire.

(ii) Si la nébulosité est moyennement variable, la réduction correspondant à la colonne 21 donne les meilleurs résultats.

(iii) Si la nébulosité est très variable, les données moyennes ne sont plus satisfaisantes, à cause des phénomènes de non-linéarité thermique, ce qui implique que seule la réduction correspondant à la colonne 11 devrait être employée.

Ces conclusions ne valent cependant que dans les conditions particulières étudiées par ces auteurs, et ne devraient pas être considérées comme automatiquement valables dans tout type de simulation thermique. Un supplément de recherche est donc nécessaire à ce niveau. De même, un champ d'investigation reste ouvert pour développer de nouveaux modèles précis et/ou climatiquement versatiles, qui soient spécifiques aux classes où des applications nombreuses les rendent nécessaires.

En attendant l'apparition de tels modèles, il convient d'évaluer ceux susceptibles d'être plus particulièrement utilisés par les concepteurs dans un climat donné, et d'évaluer le gain ou la perte de précision qui résulterait de leur utilisation avec des données réduites différemment.

2.7 Références

2.1- Davies J.A., 1981 - Models for estimating incoming solar irradiance. Rpt. #81-2, Canadian Climate Centre, Environnement Canada, Downsview, Ontario.

2.2- Braslau N. & Dave J.V., 1973- Effect of aerosols on the transfer of solar energy through realistic model atmospheres. J. Appl. Met., 12: 601-619

2.3- Selby J.E.A. & McClatchey R.A., 1975- Atmospheric Transmittance from 0.25 to 28.5 μm : computer code LOWTRAN 3, AFCRL-TR-75-0255

2.4- Somerville R.C.J. et al., 1974- The Giss model of the global atmosphere. J.Atm. Sc., 31: 74-117

2.5- Temkin R.L., Weare B.C. & Snell F.M., 1975- Feedback coupling of absorbed solar radiation by three model atmospheres with clouds. J.Atm. Sc., 32: 873-880

2.6- Fouquart Y. & Bonnel B., 1980- Computations of solar heating of the earth's atmosphere: a new parameterization. Contr. Atm. Phys., 53: 35-62

2.7- Paulin G., 1974- Parameterization of radiation in the DPR primitive equations model. Internal notes, Atmospheric Environment Service, Dorval, Canada, 56 p.

2.8- Davies J.A. et al., 1975- Estimating global solar radiation Bound. Layer Met., 9: 33-52

2.9- Atwater M.A. & Ball J. T., 1978- A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations. Solar Energy, 21: 163-170

2.10- Suckling P.W. & Hay J.E., 1977- A cloud layer-sunshine model for estimating direct, diffuse and total solar radiation. Atmosphere, 15: 194-207

2.11- Davies J.A. & Hay J.E., 1980- Calculation of the solar radiation incident on a horizontal surface. Proc. First Canadian solar radiation workshop, Toronto 1978. Supply and Services Canada

2.12- Canadian Climate Center, 1980- Define, develop and establish a merged solar and meteorological computer data base. Rpt. #80-8 prepared by MacLaren et al. Environnement Canada, Downsview, Ontario.

2.13- Barbaro S. et al., 1978- Global solar radiation in Italy. Solar Energy, 20: 431-435

2.14- Bennett I., 1965- Monthly maps of mean daily insolation for the United States. Solar Energy, 9: 145-158

2.15- Bennett I., 1964- A method for preparing maps of mean daily global radiation. Arch. Met. Geoph. Biskl, B13: 216-248

2.16- Biga A.J. & Rosa R., 1980- Estimating solar irradiation sums from sunshine and cloudiness observations. Solar Energy, 25: 265-272

2.17- Calvet C., 1976- Rayonnement global et durée de l'insolation au Maroc. La Météorologie, 5: 171-175

2.18- Driedger H.L. & Catchpole A.J.W., 1970. Estimation of solar radiation receipt from sunshine duration at Winnipeg. Met. Mag., 99: 285-291

2.19- Gariépy J., 1980- Estimation du rayonnement solaire global. Rapport interne, Service de Météorologie, Québec.

2.20- Goldberg B. & Klein W.H., 1980. A model for determining the spectral quality of daylight on a horizontal surface at any geographical location. Solar Energy 24: 351-357

2.21- Gueymard C. et al., 1978- Données statistiques pour l'utilisation du rayonnement solaire à Montréal. Proc. SESCI Conf. (Renewable alternatives) London, Ontario.

2.22- Hamlen S.S. & Hamlen W.A., 1977. A distributed lag model to predict incoming solar radiation. Solar Energy, 19: 217-218

2.23- Hamon R.W. et al., 1954. Insolation as an empirical function of daily sunshine duration. Mon. Weath. Rev., 82: 141-146

2.24- Hay J.E., 1979. Calculation of montly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. Solar Energy, 23: 301-307

2.25- Iqbal M., 1979. Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine. Solar Energy, 23: 169-173

2.26- Kimura K. & Stephenson D.G., 1969. Solar radiation on cloudy days. ASHRAE Trans., 75, #2106

2.27- Klein W.H., 1948. Calculation of solar radiation and the solar heat load on man. J. Meteorol., 5: 119-129

2.28- Lumb F.E., 1964. The influence of cloud on hourly amounts of total solar radiations at the sea surface. Quart. J.Roy. Met. Soc., 90: 43-56

2.29- Lund I.A., 1968. Relationships between insolation and other surface weather observations at Blue Hill Solar Energy, 12: 95-106

2.30- Masson H., 1966. Quantitative estimation of solar radiation. Solar Energy, 10: 119-124

2.31- Mateer C.L., 1955. A preliminary estimate of the average insolation in Canada. Can. J. Agri. Sc., 35: 579-594

2.32- Mateer C.L., 1963. On the relationship between global radiation and cloudiness at ocean station P. Arch. Met. Geoph. Biokl., B12: 482-490

2.33- Modi V. & Sukhatme S.P., 1979. Estimation of daily total and diffuse insolation in India from weather data. Solar Energy, 22: 407-411

2.34- Morris C.W. & Lawrence J.H., 1969. A mathematical model for predicting solar radiation. ASHRAE Trans., 75, #2110

2.35- Munroe M.M., 1980. Estimation of totals of irradiance on a horizontal surface from U.K. average meteorological data. Solar Energy, 24: 235-238

2.36- Nicolet M. & Dogniaux R., 1951. Étude de la radiation globale du soleil. Mémoires IRM, Vol. 47, 50 pp.

2.37- Norris D.J., 1968. Correlation of solar radiation with clouds. Solar Energy, 12: 107-112

2.38- Page J.K., 1964. The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitude 40°N-40°S. Proc. Conf. ONU, Rome 1961, 378-388

2.39- Page J.K., 1976. The estimation of montly mean values of daily short wave irradiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 60°N to 40°S. Rpt. BS 32, Dpt. Building Science, University of Sheffield.

2.40- Page J.K., 1978. Methods of estimation of solar energy on vertical and inclined surfaces. Rpt. BS 46, Dpt. Building Science, University of Sheffield.

2.41- Perrin de Brichambaut C., 1975. Estimation des ressources solaires en France. Cahiers AFEDES no. 1 Sup., Paris, 63pp.

2.42- Perrin de Brichambaut C., 1976. Météorologie et énergie: l'évaluation du gisement solaire. La Météorologie, 5: 129-158

2.43- Perrin de Brichambaut C., 1977. Évaluations de l'énergie solaire incidente sur divers capteurs. Proc. conf. Énergie solaire, Cargèse 1977. CNRS, Paris.

2.44- Perrin de Brichambaut C., 1978. Estimation du rayonnement solaire. Rpt. Direction de la Météorologie, Paris, 48 pp.

2.45- Randall C.M. & Leonard S.L., 1973. Reference insolation data base: a case history, with recommendations. Proc. Solar energy data workshop NOAA/NSF, Silver Spring.

2.46- Rapp D. & Hoffman A.A.J., 1977. On the relation between insolation and climatological variables. Energy Conversion, 17: 31-35, 163-181

2.47- Reddy S.J., 1971. An empirical method for the estimation of total solar radiation. Solar Energy, 13: 289-290

2.48- Rietveld M.R., 1978. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. Agri. Met., 19: 243-252

2.49- Sabbagh H.A. et al., 1966. Estimation of the total solar radiation from meteorological data. Solar Energy, 19: 307-311

2.50- Schulze R.E., 1976. A physically based method of estimating solar radiation from suncards. Agri. Met., 16: 85-101

2.51- Smith G.E., 1976. Solar radiation data base development based on bright sunshine data. Proc. ISES/SESCI Conf., Winnipeg.

2.52- Stanhill G., 1966. Diffuse sky and cloud radiation in Israël. Solar Energy, 10: 96-101

2.53- Swartman R.K. & Ogunlade D., 1967. Solar radiation estimates from common parameters. Solar Energy, 11: 170-172

2.54- Swartman R.K. & Ogunlade D., 1971. Correlation of solar radiation with common parameters in Toronto. Solar Energy, 13: 345-347

2.55- Titus R.L. & Truhlar E.J., 1969. A new estimate of average solar radiation in Canada. Atmospheric Environment Service, CLI 7-69, Downsview, Ontario.

2.56- Tricaud J.F., 1977. Contribution à l'estimation des ressources énergétiques solaires, pour des plans diversement orientés et inclinés. Int. Rpt., CNRS Odeillo, 19 pp.

2.57- Watt A.D., 1978. On the nature and distribution of solar radiation. USDOE HCP/T 2552-01, 256 pp.

2.58- Weyss N., 1977. Direct radiation data formulation from global radiation and other given measurements, using a computer aided method. Proc. UNESCO/WMO Solar Energy Symposium, Geneva: 171-181 (WMO#477)

2.59- Brinkworth B.J., 1977. Autocorrelation and stochastic modelling of insolation sequences. Solar Energy, 19: 343-347

2.60- Goh T.H. & Tan K.J., 1977. Solar radiation model building with data of non-uniform reliability and completeness Proc. UNESCO/WMO Solar Energy Symposium, Geneva: 89-99 (WMO#477)

2.61- Mustacchi C. et al., 1979. Stochastic simulation of hourly global radiation sequences. Solar Energy, 23: 47-51

2.62- Mejon M.J. et al., 1980. Simulation de l'énergie solaire directe au pas de temps de la minute. Rev. Phys. Appl., 15: 113-122

2.63- Boileau E., 1979. Discussion d'un modèle statistique en météorologie solaire. Rev. Phys. Appl., 14: 145-152

2.64- Goussebaïle J., 1978. Analyses statistiques de données journalières d'insolation et d'irradiation. Thèse Doct. Ing., Université de Grenoble.

2.65- Bénard C. et al., 1978. Caractérisation de la stabilité de l'intensité solaire par l'analyse temporelle de séries aléatoires en France et au Pérou. La Météorologie, 13: 53-71

2.66- Sfeir A.A., 1980. A stochastic model for predicting solar system performance. Solar Energy, 25: 149-154

2.67- Bénard C. et al., 1978. Prévision du comportement d'un système de stockage solaire à l'aide de modèles stochastiques récurrents. La Météorologie, 14: 69-80

2.68- Lestienne R., 1979. Application du modèle Markovien simplifié à l'étude du comportement du stockage d'une centrale solaire. Rev. Phys. Appl., 14: 139-144

2.69- Lameiro G.F., 1979. Stochastic models of solar energy systems. SEAL, Colorado State University.

2.70- Randall C.M. & Whitson M.E., 1977. Hourly insolation and meteorological data bases including improved direct insolation estimates. Sandia Lab./Aerospace Rpt. #ART-78 (7592)-1

2.71- Bahm R.J., ed., 1981. Satellites and forecasting of solar radiation, Proc. Conf. AS/ISES, Washington.

2.72- Won T.K., 1977. The simulation of hourly global radiation from hourly reported meteorological parameters. Proc. SESCI Conf., Edmonton, Alta."

2.73- ASHRAE, 1975. Procedure for determining heating and cooling loads for computerizing energy calculations, algorithms for building heat transfer subroutines. New York.

2.74- NOAA, 1978. SOLMET User's manual. Rpt. TD-9724, National Climate Center, Asheville, NC.

2.75- Paulin G., 1980. Simulation de l'énergie solaire au sol. Atmosphere, 18: 286-303

2.76- Bugler J.W., 1977. The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation. Solar Energy, 19: 477-491

2.77- Iqbal M., 1980. Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global radiation on a horizontal surface. Solar Energy, 24: 491-503

2.78- Klein S.A. et al., 1979. TRNSYS User's manual, EES Rpt. 38-10, University of Wisconsin, Madison.

2.79- Orgill J.F. & Hollands K.G.T., 1976. WATSUN User's manual. University of Waterloo, Ontario. voir aussi: Solar Energy, 19: 357-359.

2.80- Whillier A., 1956. The determination of hourly values of total solar radiation from daily summations. Arch. Met. Geoph. Biokl., B7: 197-204

2.81- Liu B.Y.H. & Jordan R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, 4: 1-19

2.82- Collares-Pereira M. & Rabl A., 1979. The average distribution of solar radiation- Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. Solar Energy, 22: 155-164

2.83- Tuller S.E., 1976. The relationship between diffuse, total and extraterrestrial solar radiation. Solar Energy, 18: 259-263

2.84- Deris N., 1980. Statistical determination of diffuse radiation in Europe and Turkey. Third Int. Conf. Alternative Energy Sources, Miami.

2.85- Iqbal M., 1979. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data. Solar Energy, 22: 81-86

2.86- Duffie J.A. & Beckman W.A., 1980. Solar engineering of thermal processes. J. Wiley, New York, 762 pp.

2.87- Biga A.J. & Rosa R., 1979. Contribution to the study of the solar radiation climate in Lisbon. Solar Energy. 23: 61-67

2.88- Ruth D.W. & Chant R.E., 1976. The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada. Solar Energy, 18: 153-154

2.89- Choudhury N.K.D., 1963. Solar radiation at New-Delhi Solar Energy, 7: 44-52

2.90- Kalma J.D. & Fleming P.M., 1972. A note on estimating the direct and diffuse components of global radiation. Arch. Met. Geoph. Biokl., B29: 191-205

2.91- Klein S.A. & Duffie J.A., 1978. Estimation of monthly average diffuse radiation. Proc. AS/ISES Conf., Denver: 672-675

2.92- Siebers D.L. & Viskanta R., 1977. Comparison of long-term flat-plate solar collector performance calculations based on averaged meteorological data. Solar Energy, 19: 163-169

2.93- Hay J.E., 1976. A revised method for determining the direct and diffuse components of the total shortwave radiation. Atmosphere, 14: 278-287

2.94- Boes E.C., 1975. Estimating the direct component of solar radiation. Rpt. SAND75-0565, Sandia Lab. Albuquerque

CHAPITRE 3 - EVALUATION DE DEUX MODELES HORAIRES BASES SUR LES OBSERVATIONS METEOROLOGIQUES

3.1 Introduction

Le calcul du comportement thermique des systèmes solaires actifs ou passifs, ainsi que l'évaluation des effets dynamiques sur l'énergie consommée pour le chauffage et/ou le refroidissement des édifices, seront d'autant plus précis que le calcul des apports solaires sera effectué avec exactitude.

Ainsi, il faut remarquer que les valeurs horaires du rayonnement solaire constituent une donnée indispensable pour opérer les gros programmes de simulation thermique tels BLAST [3.1], Cal-ERDA [3.2], DOE-2 [3.3] et NBLSD [3.4].

Tous les programmes de cette catégorie utilisent un pas de temps d'une heure, de façon à permettre l'utilisation des données météorologiques observées aux aéroports. De plus, ils ont tous pour but de suivre les effets dynamiques résultant des variations simultanées des principaux paramètres d'environnement (température, vitesse du vent et rayonnement solaire), ce qui entraîne la nécessité de recourir à des valeurs particulières de ces paramètres, plutôt qu'à des valeurs moyennes. Donc en ce qui concerne le rayonnement solaire, les modèles de calcul appropriés sont ceux de la colonne 11 du tableau 2.1 .

Dans ce chapitre, on trouvera l'évaluation des modèles de l'ASHRAE [3.5] et de Won [3.6], tous deux classifiés de type A11 dans notre grille. Plusieurs autres modèles existent dans cette catégorie, comme il apparaît au chapitre 2, et un choix a dû être fait pour maintenir l'envergure de la présente étude dans des limites raisonnables. Les modèles de l'ASHRAE et de Won ont finalement été retenus pour l'ensemble des raisons suivantes:

- le modèle de l'ASHRAE intervient dans de nombreux programmes de simulation thermique des bâtiments (par exemple ceux déjà cités précédemment, [3.1] à [3.4]), et dans les procédures standard de calcul des charges de refroidissement adoptées par la majorité des ingénieurs thermiciens en Amérique du Nord et dans de nombreux autres pays; la notoriété de cet organisme en fait donc un modèle de référence en ce qui concerne l'ingénierie.
- le modèle de Won a une approche semi-empirique semblable à celle de l'ASHRAE, mais un peu plus détaillée, donc possiblement plus précise; il a été développé à partir de données canadiennes, et devrait donc être un bon candidat pour les conditions climatiques du Québec.
- ces deux modèles ainsi que plusieurs autres de type "physique" de la classe A11 ont déjà été évalués par Mc Laren et al. [3.7] et Davies [3.8] pour quelques stations canadiennes; les modèles physiques ne semblant pas encore être utilisés en génie, il n'a pas paru utile de poursuivre leur évaluation; l'étude de Mc Laren et al. a cependant permis de montrer que le modèle de Won apparaissait convenable sur l'ensemble

des stations étudiées, alors que le modèle de l'ASHRAE était jugé systématiquement moins précis; un des buts du présent travail est donc de vérifier si ces conclusions restent valables au Québec, en recourant à une analyse statistique très détaillée mais portant sur un nombre limité de stations.

Comme il était mentionné dans l'introduction, il n'existe pas au Québec de données de rayonnement sur des plans inclinés. Ainsi l'évaluation du modèle de l'ASHRAE -qui à la différence du modèle de Won permet le calcul sur des plans inclinés- n'a pu être faite qu'en se référant aux données existantes, sur surface horizontale. Cette limitation reste évidemment valable pour tous les modèles qui seront abordés dans les chapitres ultérieurs.

3.2 Description des modèles de l'ASHRAE et de Won

Globalement, les deux algorithmes ont un même type de structure. Une première étape concerne le calcul du rayonnement en supposant le ciel clair. L'étape finale consiste à corriger le résultat précédent pour tenir compte de manière empirique de la couverture nuageuse réellement observée.

Les algorithmes sont présentés de façon schématique à la figure 3.1 et de façon détaillée à l'annexe 1. En ce qui concerne l'étape du calcul par ciel clair, le modèle de l'ASHRAE est basé sur les travaux de Stephenson [3.9], [3.10] et ceux de Threlkeld et Jordan [3.11].
Par ciel clair, l'équation principale concerne le calcul du rayonnement direct, I_b^* (l'astérisque désignant les conditions de ciel clair):

$$I_b^* = A\, C_N \exp(-B / \sin h) \sin h \qquad (3.1)$$

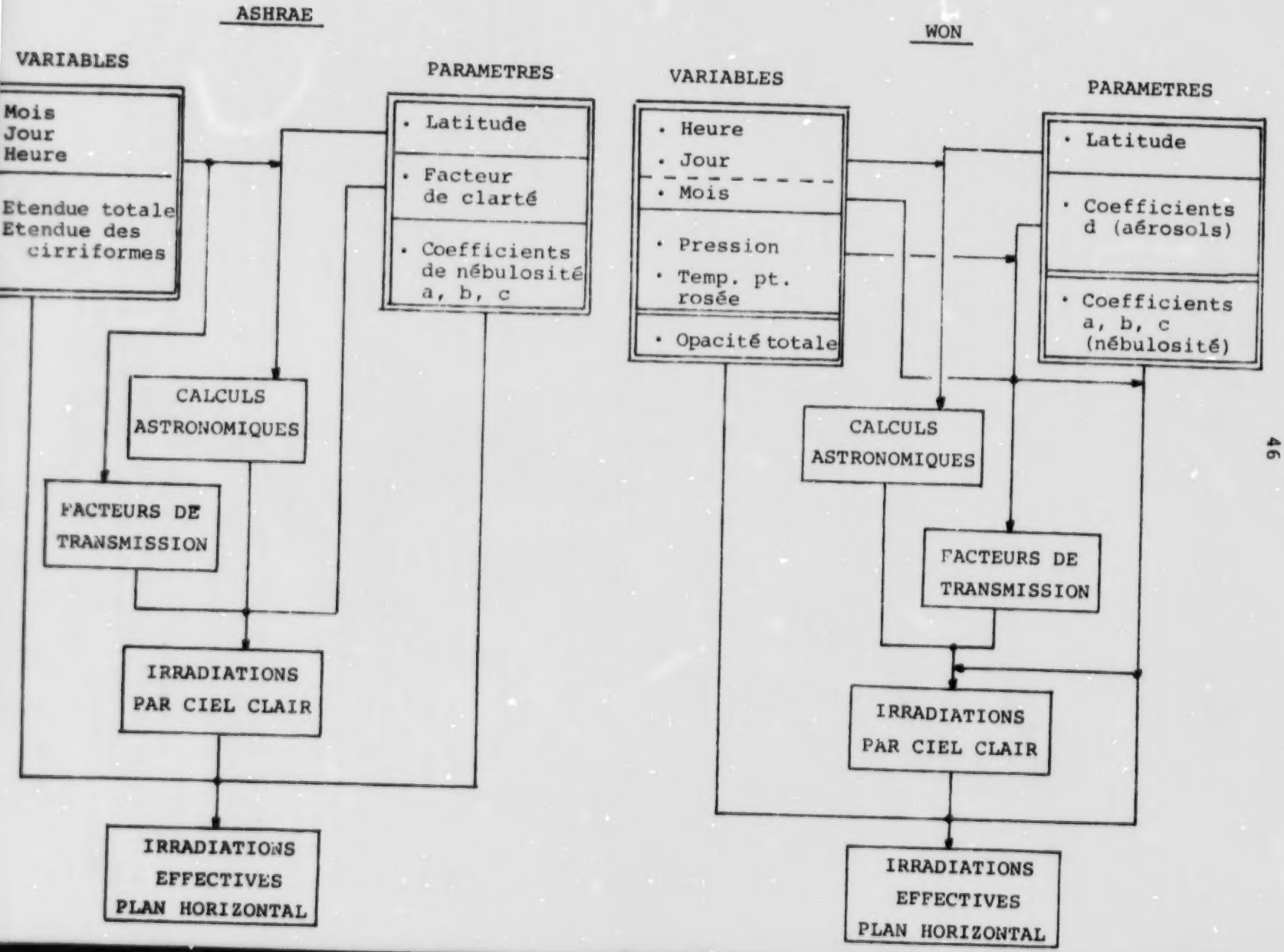
où h est la hauteur solaire, A et B sont des coefficients ayant une variation saisonnière, et C_N est le facteur de clarté ("clearness number") défini par Threlkeld et Jordan pour corriger les valeurs standard de I_b^* obtenues par intégration du modèle spectral théorique de Moon [3.12]; les valeurs saisonnières (été/hiver) de C_N ont été cartographiées par Threlkeld et Jordan, mais seulement pour les Etats-Unis et de façon très rudimentaire, ce qui constitue une grave limitation du modèle de l'ASHRAE. Aux Etats-Unis, C_N varie suivant les saisons et les régions entre 0.85 et 1.15 . Pour les autres pays, faute de données supplémentaires, il faut supposer que $C_N = 1$, ce qui est l'hypothèse retenue ici.

D'après l'équation (3.1), on peut encore remarquer que pour C_N fixé et pour un instant donné, I_b^* ne dépend que de la latitude (par l'intermédiaire de la hauteur h).

Le modèle de Won est plus précis à ce niveau puisqu'il incorpore les effets physiques de la vapeur d'eau, des modécules, de l'ozone et des poussières atmosphériques, sous la forme explicite d'un produit de transmittances:

$$I_b^* = t_a\, t_R\, t_w\, I_o \qquad (3.2)$$

Figure 3.1 - Schématisation des algorithmes de l'ASHRAE et de Won



où t_a est la transmittance après diffusion et absorption des aérosols (fonction de la hauteur solaire h, du mois et de la zone climatique), où t_R est la transmittance après diffusion moléculaire de Rayleigh (fonction de la hauteur solaire h et de la pression barométrique à la station p), où t_w est la transmittance après absorption par la vapeur d'eau (fonction de la température du point de rosée, T_{dp}, et de la hauteur solaire, h), et où I_o est l'irradiance extraterrestre sur un plan horizontal.
On remarquera que dans sa version originale [3.6], le modèle de Won permettait seulement le calcul de l'irradiation globale; il a été complété ultérieurement [3.7] pour permettre un calcul séparé des irradiations globale et diffuse. C'est cette version généralisée qui est évaluée dans la présente étude.

En ce qui concerne l'étape finale où s'applique la correction due à la nébulosité réelle, les deux modèles ont encore une approche semblable. L'irradiation globale, I, correspondant à la nébulosité observée, est obtenue par:

$$I = F_C \, I^* \qquad (3.3)$$

où I* est l'irradiation globale par ciel clair et F_C un facteur de clarté obtenu empiriquement par régression polynomiale en fonction de la nébulosité N:

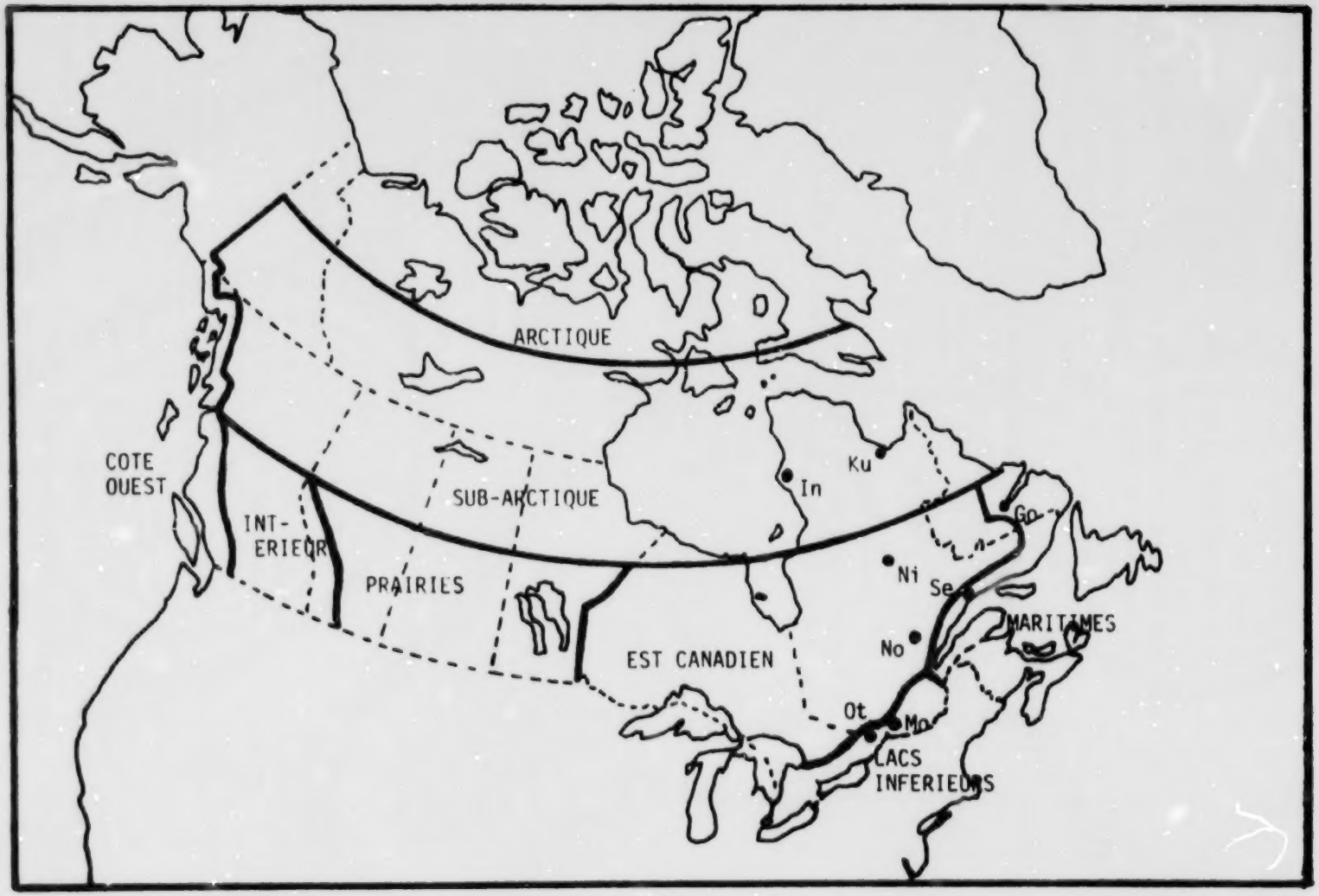
$$F_C = a + b\,N + c\,N^2 \qquad (3.4)$$

L'étude de Kimura et Stephenson [3.13] utilisant des données mesurées à Ottawa (pendant quatre mois seulement) a été retenue par l'ASHRAE pour son modèle, et des valeurs trimestrielles des coefficients a, b et c sont suggérées. Dans le cas du modèle de Won, des valeurs mensuelles de ces coefficients n'étaient fournies que pour la région des "Prairies" dans la publication originelle [3.6].

L'étude subséquente de Mc Laren et al. [3.7] a cependant permis d'étendre ce modèle aux 8 régions climatiques définies par Won pour couvrir l'ensemble du Canada. Dans le présent travail, on a considéré, comme le suggère la carte 2 (redessinée de Won) que les stations d'Ottawa et de Montréal entraient dans la région des "Lacs Inférieurs", alors que Sept-Iles et Goose Bay relevaient de la région des "Maritimes". Il est à noter que la plus grande partie du Québec relèverait du climat de la région "Est Canadien" qui couvre également la majeure partie de l'Ontario (carte 2). Il faut signaler enfin une légère différence au niveau de la définition de la nébulosité utilisée par les deux modèles, telle qu'intervenant dans l'équation (3.4). Il existe en effet deux observations de l'état du ciel reliée à la nébulosité:

- la couverture nuageuse (ou étendue), N_{ei}, qui est la proportion du ciel couvert de nuages, aussi fins soient-ils;
- la couverture opaque (ou opacité), N_{pi}, qui est la proportion du ciel couvert par la partie opaque des nuages, donc à travers lesquels le ciel ou d'autres nuages ne sont pas apparents.

Carte 2 - Régions climatiques pour le modèle de Won.



Jusqu'en décembre 1976, ces deux observations étaient faites pour chaque couche de nuages (quatre couches au maximum), puis sommées pour obtenir l'étendue totale, N_{et}, et l'opacité totale, N_{pt}:

$$N_{et} = \sum_{i=i}^{4} N_{ei} \qquad (3.5)$$

$$N_{pt} = \sum_{i=i}^{4} N_{pi} \qquad (3.6)$$

Depuis 1977, l'étendue n'est plus relevée couche par couche sous forme numérique comme auparavant, mais sous forme de code général à l'usage de l'aviation, qui est inutilisable pour un calcul explicite.

Alors que le modèle de Won utilise N_{pt} pour incorporer dans l'équation (3.4), Kimura et Stephenson ont utilisé une nébulosité corrigée, N_{ct}, obtenue en soustrayant à N_{et} la moitié de l'étendue des cirriformes (qui sont les nuages les plus élevés et les moins opaques), soit:

$$N_{ct} = N_{et} - \frac{1}{2} \sum_{cirr.} N_{ei} \qquad (3.7)$$

D'après ce qui précède, cette équation n'est plus calculable depuis 1977, ce qui ne permet plus d'utiliser au Canada le modèle de l'ASHRAE tel quel. Pour respecter l'intégrité de ce modèle, il a été décidé de le tester seulement jusqu'en 1976 inclusivement. Cependant, il est possible (et conseillé) d'éviter ce problème en remplaçant simplement N_{ct} par N_{pt} dans (3.4). Ces deux procédures semblent d'ailleurs donner des résultats équivalents d'après les tests préliminaires effectués avec une partie des données de Montréal et de Goose Bay.

3.3 Procédures de calcul

Un programme informatique a été écrit, pour contenir à la fois les modèles de l'ASHRAE et de Won, les entrées (lecture et vérification des données provenant des rubans) et les tests statistiques qui seront décrits plus loin.

Les algorithmes des deux modèles ont été transcrits en FORTRAN tels que présentés dans la littérature (voir annexe 1), donc en évitant toute tentative de transformation ou d'interprétation.

On notera cependant que les coefficients A, B et C de l'ASHRAE ont été obtenus par calcul au moyen de séries de Fourier, tel que suggéré par l'ASHRAE en 1971 [3.14], plutôt que sous forme tabulée avec 12 valeurs mensuelles, comme il a été retenu dans la réédition de ce document [3.5].

Les rubans contenant les informations météo et les mesures de rayonnement ont été préparés suivant le format décrit en détail dans un

rapport préliminaire [3.15] et plus succinctement au chapitre 1. Le tableau 1.7 résume le format de leur contenu. Les deux modèles ont été testés avec les données des stations de Montréal et Goose Bay en ce qui concerne les composantes diffuse et globale, et avec les stations de Sept-Iles et Ottawa pour le rayonnement global. L'étude couvre les années 1973-1976 pour les deux modèles, et seules les périodes horaires complètes ont été retenues. Par exemple, si l'heure du lever de soleil est calculée comme étant 7 h 15, la première période horaire considérée est de 8 à 9 heures. La même procédure est évidemment appliquée le soir, et élimine donc la fraction d'heure précédant immédiatement le coucher de soleil. Dans cet exemple, celui-ci aurait lieu à 16 h 45 et la dernière période considérée serait de 15 à 16 heures; donc pour une durée du jour de 9.5 heures, seulement 8 périodes horaires sont considérées dans ce cas.

3.4 Méthode d'évaluation statistique

Idéalement, les valeurs de rayonnement calculées devraient être identiques aux valeurs mesurées. Mais en fait, tout modèle mathématique n'est qu'une représentation approchée des processus physiques complexes qui constituent la réalité, et produit donc des valeurs qui s'écartent plus ou moins des mesures expérimentales. Les valeurs mesurées ne sont d'ailleurs pas exemptes d'erreurs non plus. La précision pour les mesures routinières de rayonnement du réseau d'Environnement Canada est estimée à 5% [3.16]. Ce chiffre est une valeur moyenne, et il est certainement plus élevé pour des hauteurs solaires faibles ($h < 10$ deg.) à cause de "l'erreur cosinus" inhérente aux pyranomètres. La précision sur le rayonnement diffus risque d'être également affectée par la correction appliquée aux valeurs mesurées pour tenir compte de l'ombrage introduit par le diffusographe. Par ciel clair, il semble que la valeur de cette correction soit sous-estimée en hiver (donc pour h faible) [3.17], et dans ces conditions, la précision des mesures de rayonnement diffus pourrait se dégrader jusqu'à environ 10-15%.

Puisqu'il n'est pas possible de connaître avec certitude la valeur exacte du phénomène observé, il est nécessaire d'utiliser telles quelles les données mesurées comme base de référence, étant entendu que, dans certaines conditions, le modèle peut s'approcher plus de la réalité que de la mesure, donc être pénalisé par l'imprécision de la mesure.

3.4.1 Tests utilisés

Tout test statistique cherche à donner un certain type d'information quantitative sur l'importance de "l'erreur apparente" du modèle. Une discussion pertinente sur ce sujet apparaît à la référence [3.7].

Une erreur individuelle sera définie comme la différence entre la valeur calculée et la valeur mesurée pour une même heure:

$$e_i = I_{cal} - I_{mes} \qquad (3.8)$$

Il existe de nombreuses façons de compiler l'ensemble des erreurs calculables sur une période donnée, et le problème est donc de choisir les compilations statistiques qui permettent de décrire et d'apprécier le comportement des modèles le plus complètement et le plus simplement.

Comme il n'existe pas encore de concensus sur une méthode statistique d'évaluation des modèles de rayonnement, différents indices ont été envisagés pour la présente étude. En particulier l'erreur moyenne de tendance (obtenue par une simple moyenne algébrique des erreurs individuelles), la disymétrie et l'applatissement des distributions d'erreurs, ainsi que le coefficient de corrélation entre les séries de valeurs calculées et mesurées, ont été utilisés dans une phase préliminaire, mais leur valeur explicative a été jugée moins claire ou moins discriminante que celle obtenue par les indices finalement retenus.

Ceux-ci sont, pour chaque mois, chaque station et chaque modèle:

(i) L'erreur quadratique moyenne (qui sera nommée dans la suite "RMS" pour simplifier) pour une heure donnée, et normalisée par l'irradiation horaire moyenne du mois (I_{hm}, calculée sur la période 1973-1978 et apparaissant au tableau 3.1) :

$$RMS_h = \frac{100}{I_{hm}} \sqrt{\frac{\sum_{i=i}^{n_h} e_i^2}{n_h}} \qquad (3.9)$$

où n_h est le nombre d'observations faites à l'heure h pour le mois considéré, et e_i est défini par (3.8)

(ii) L'erreur RMS pour l'ensemble des valeurs horaires du mois:

$$RMS = \frac{100}{I_{hm}} \sqrt{\frac{\sum_{i=i}^{n} e_i^2}{n}} \qquad (3.10)$$

où $$n = \sum_{mois} n_h \qquad (3.11)$$

(iii) L'histogramme des fréquences de l'erreur relative pour une heure donnée, e_{ri}, par classe de 5%, avec:

$$e_{ri} = \frac{100}{I_{hm}} e_i \qquad (3.12)$$

(iv) L'histogramme des fréquences de l'erreur relative pour l'ensemble des valeurs horaires du mois, e_{rim}, par classe de 5%, où la série des e_{rim} résulte de l'agrégation de l'ensemble des e_{ri}.

3.4.2 Influence du seuil de rayonnement

Tous les tests qui viennent d'être décrits sont répétés sur un nouvel ensemble de valeurs d'où sont exclues les irradiations globales horaires inférieures à un certain seuil. L'intérêt d'évaluer la précision des modèles horaires avec un seuil a été abordé dans l'introduction. Le choix d'une valeur particulière pour ce seuil est matière à discussion, vu le grand nombre d'applications et de situations possibles. Pour les

Tableau 3.1 - Valeurs mensuelles de l'irradiation horaire moyenne, I_{hm} (MJ m^{-2}), pour Sept-Iles, Ottawa, Goose Bay et Montréal.

	SEPT-ILES	OTTAWA	GOOSE BAY		MONTREAL	
Mois	global	global	global	diffus	global	diffus
1	0.478	0.560	0.434	0.242	0.525	0.313
2	0.751	0.837	0.660	0.364	0.784	0.396
3	0.962	1.033	0.938	0.482	0.975	0.423
4	1.061	1.260	1.078	0.618	1.154	0.485
5	1.189	1.217	1.156	0.578	1.183	0.522
6	1.159	1.305	1.035	0.528	1.297	0.573
7	1.153	1.321	1.057	0.520	1.328	0.567
8	1.138	1.260	0.959	0.512	1.216	0.538
9	0.863	0.956	0.696	0.423	0.975	0.428
10	0.653	0.769	0.537	0.329	0.711	0.328
11	0.437	0.500	0.363	0.221	0.490	0.269
12	0.378	0.430	0.311	0.186	0.398	0.248

utilisations thermiques de l'énergie solaire basées sur des capteurs plans actifs, la valeur approximative du seuil réel (ou rayonnement critique) au-delà duquel le capteur commence à avoir un rendement positif - donc à être mis en service - peut être obtenue au moyen de l'équation classique de Hottel-Whillier-Bliss, en supposant pour simplifier que le régime permanent est établi (voir par exemple [3.18]):

$$Q_u = A_c \left[F_R (\tau\alpha)_n I_T - F_R U_L (T_i - T_a)\right] \qquad (3.13)$$

où Q_u est l'énergie utile délivrée par le capteur, A_c est sa surface, $F_R (\tau\alpha)_n$ et $F_R U_L$ sont des caractéristiques thermo-optiques du capteur, I_T est l'irradiance totale incidente sur le plan du capteur et $(T_i - T_a)$ est la différence des températures d'entrée du fluide et de l'air ambiant.

Pour $Q_u = 0$ (donc un rendement nul), on obtient le rayonnement critique I_{Tc} par:

$$I_{Tc} = \frac{[F_R U_L](T_i - T_a)}{[F_R (\tau\alpha)_n]} = \frac{U_L}{(\tau\alpha)_n} \Delta T \qquad (3.14)$$

Pour des capteurs plans actifs sans concentration, le facteur $U_L / (\tau\alpha)_n$ varie suivant la construction des capteurs entre 5 et 10. Le ΔT dépend des conditions d'utilisation. Il peut varier entre environ 10°C pour le chauffage domestique au printemps à environ 50°C pour le préchauffage de l'eau industrielle en hiver.

La fourchette des valeurs possibles de I_{Tc} s'étend donc entre environ 50 et 500 W_m^{-2} suivant les capteurs, les applications et la saison. Les valeurs moyennes les plus courantes sont d'environ 200 à 250 W_m^{-2}. Les données de rayonnement n'étant pas disponibles sur des plans inclinés, il était de toute façon impossible d'entreprendre une étude multi-seuil, très lourde au demeurant. Un compromis a donc été arbitrairement adopté en définissant une seule valeur seuil de 100 W_m^{-2} sur le plan horizontal; sous nos latitudes, cela correspond à environ 150-250 W_m^{-2} par une journée d'hiver à faible nébulosité, sur un plan incliné à 60 deg. au sud (qui est l'optimum pour l'utilisation en cette saison).

Cette irradiance moyenne de 100 W_m^{-2} correspond à une irradiation horaire de 0.36 MJ m^{-2}. Ainsi pour les indices statistiques "avec seuil", seules sont considérées les heures pour lesquelles l'irradiation globale mesurée est supérieure à 0.36 MJ m^{-2}.

3.5 Résultats pour le rayonnement global

Pour faciliter l'interprétation des résultats, la discussion sera d'abord détaillée pour une seule station (Sept-Iles), puis étendue plus sommairement aux trois autres.

3.5.1 Evaluation pour Sept-Iles

3.5.1.1 Ensemble des valeurs horaires avec et sans seuil

Pour tous les mois à une exception près (août, sans seuil), le modèle de

Won obtient la plus faible erreur RMS (formule 3.10) sur l'ensemble des valeurs horaires (figure 3.2). L'erreur RMS du modèle de Won est également relativement moins affectée de variations saisonnières que celle de l'ASHRAE. D'autre part, la différence entre les erreurs RMS des deux modèles est assez faible pendant l'été et devient considérable d'octobre à décembre.

Lorsqu'on considère le seuil de 0.36 MJ m^{-2}, la différence entre les deux modèles s'accentue très nettement (fig. 3.2). En général, l'introduction du seuil a pour effet d'augmenter la valeur des erreurs RMS. Un cas extrême est celui du mois de novembre où le RMS de l'ASHRAE passe de 38.8% sans seuil à 49.9% avec seuil (tableau 3.2). Cette augmentation résulte en partie de la définition de RMS par l'équation (3.10). La normalisation est obtenue en divisant par I_{hm} aussi bien dans le cas sans seuil qu'avec seuil. D'autre part, le nombre de cas sans seuil (n) est supérieur au nombre de cas avec seuil (n'), et les erreurs individuelles e_i retirées lors de l'introduction du seuil sont en principe relativement faibles, de sorte qu'en général:

$$\left(\frac{\sum_{i=i}^{n'} e_i^2}{n'}\right)_{\text{seuil } 0.36} > \left(\frac{\sum_{i=i}^{n} e_i^2}{n}\right)_{\text{seuil } 0} \qquad (3.15)$$

avec $n' < n$.

Du point de vue du biais d'estimation (décrit en particulier par la fréquence des erreurs négatives), le modèle de l'ASHRAE a une forte tendance à la sous-estimation, sauf en mars et juin (tableau 3.3). L'effet du seuil renforce encore cette tendance, ce qui indique une surestimation systématique aux faibles irradiations. La proportion des erreurs individuelles négatives (donc des irradiations sous-estimées) atteint 76.2% sans seuil en décembre, et 90.4% avec seuil.

Le modèle de Won par contre affiche ici encore un comportement plus régulier d'un mois à l'autre avec une tendance à la sous-estimation en hiver et à la surestimation en été (tableau 3.3). Mais le seuil a encore pour effet d'accentuer la sous-estimation. On remarquera la performance nettement meilleure du modèle de Won pendant les six derniers mois de l'année.

La fréquence des erreurs relatives individuelles (e_{rim}) comprises entre -100 et +100% par classe de 5% apparaît aux figures 3.3 à 3.7 pour quelques mois représentatifs des comportements observés. La tendance générale à la sous-estimation pour le modèle de l'ASHRAE y apparaît pour certains mois.
Ces résultats ont également été rassemblés sous une forme plus synthétique, en considérant seulement les valeurs absolues de ces erreurs, $|e_{rim}|$, et la fréquence de ces valeurs inférieures respectivement à 10, 20 et 30%, qui sont des niveaux pouvant être qualifiés "d'acceptables" L'examen de la figure 3.8 indique un comportement sensiblement équivalent des deux modèles, sauf pour la période octobre-décembre où les résultats de l'ASHRAE confirment une nette détérioration de la précision par rapport au modèle de Won, ainsi que par rapport au reste de l'année. Ici encore, le modèle de Won apparaît beaucoup moins sensible que celui de l'ASHRAE aux fluctuations saisonnières. Il est intéressant

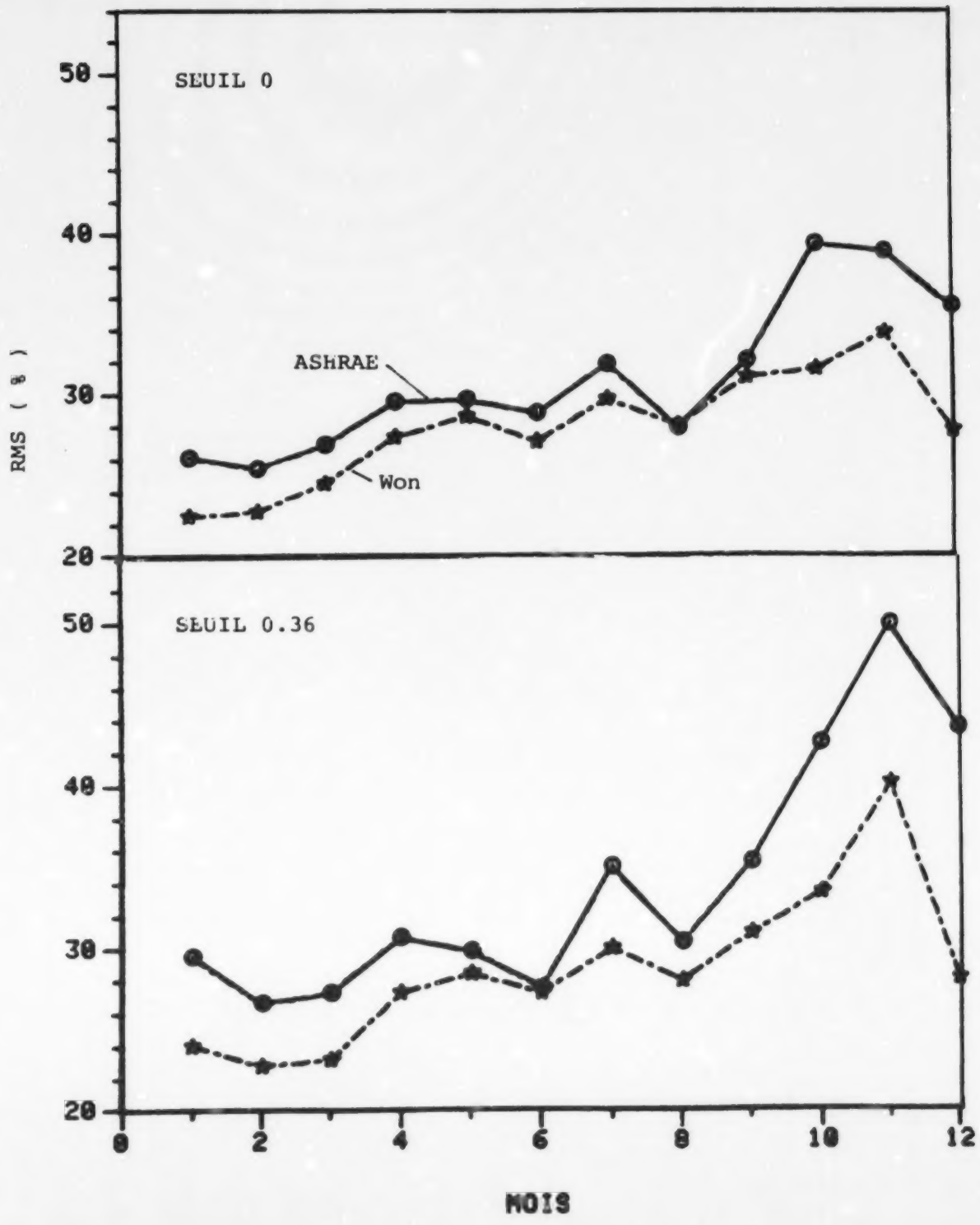


Figure 3.2 - Variation mensuelle de l'erreur RMS normalisée pour Sept-Iles, 1973-1976.

Tableau 3.2 - Récapitulation des erreurs RMS horaires normalisées pour Sept-Iles.

MODELES : ASHRAE & WON
VILLE : SEPT-ILES

ERREUR RMS HORAIRE (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

	SEUIL	1973 ASH	1973 WON	1974 ASH	1974 WON	1975 ASH	1975 WON	1976 ASH	1976 WON	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WON
JANVIER	0.00	0.0	0.0	23.6	21.8	27.2	21.1	27.4	24.7	26.1	22.5
	0.36	0.0	0.0	25.9	23.2	30.8	22.8	32.0	26.6	29.5	24.0
FEVRIER	0.00	27.0	25.3	24.8	22.0	26.0	21.8	24.5	23.3	25.4	22.8
	0.36	29.6	27.3	26.0	21.8	26.4	20.5	26.1	23.4	26.7	22.8
MARS	0.00	21.9	22.3	30.9	26.2	28.3	23.9	25.6	25.7	26.9	24.5
	0.36	22.7	22.7	32.1	25.1	28.5	21.2	25.3	23.8	27.3	23.2
AVRIL	0.00	32.1	31.5	28.6	24.1	27.3	24.8	29.8	28.2	29.5	27.4
	0.36	33.3	31.9	30.1	24.2	27.8	23.9	31.3	28.7	30.7	27.3
MAI	0.00	30.3	26.1	31.7	29.6	25.1	26.6	31.0	31.6	29.7	28.6
	0.36	30.4	24.5	33.8	31.4	24.3	25.9	30.6	31.0	29.9	28.5
JUIN	0.00	0.0	0.0	29.0	27.4	27.3	27.8	29.9	26.1	28.8	27.1
	0.36	0.0	0.0	30.5	28.5	23.9	25.2	27.6	27.9	27.6	27.3
JUILLET	0.00	27.5	34.3	32.4	31.7	37.6	27.5	26.2	27.6	31.8	29.7
	0.36	30.2	34.6	35.8	33.5	41.7	28.1	28.0	26.0	35.0	30.0
AOUT	0.00	24.3	27.2	28.6	30.0	32.5	30.6	22.8	23.6	27.9	28.1
	0.36	23.1	22.7	31.6	30.1	36.1	32.2	24.3	22.1	30.4	28.0
SEPTEMBRE	0.00	32.8	29.5	29.5	31.7	34.4	28.2	30.8	34.2	32.0	31.0
	0.36	35.6	29.1	31.9	31.3	38.9	28.5	34.2	35.0	35.3	30.9
OCTOBRE	0.00	30.5	31.2	34.3	30.2	34.2	28.6	54.4	35.7	39.3	31.5
	0.36	34.2	34.0	44.3	30.8	39.2	31.2	53.1	37.2	42.6	33.4
NOVEMBRE	0.00	40.3	33.2	35.2	36.6	37.1	33.9	42.1	31.1	38.8	33.7
	0.36	51.7	35.9	44.6	43.9	47.4	40.3	55.6	39.6	49.9	40.1
DECEMBRE	0.00	34.4	29.6	36.5	24.6	32.5	29.4	38.1	26.7	35.4	27.7
	0.36	45.5	32.3	47.9	22.5	38.4	28.3	42.9	28.6	43.5	28.1

Tableau 3.3 - Récapitulation des fréquences d'erreurs négatives (sous-estimation) pour Sept-Iles.

MODELES : ASHRAE & WON
VILLE : SEPT-ILES

PROPORTION DES ERREURS HORAIRES NEGATIVES (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

	SEUIL	1973 ASH	1973 WON	1974 ASH	1974 WON	1975 ASH	1975 WON	1976 ASH	1976 WON	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WON
JANVIER	0.00	0.0	0.0	72.3	71.8	70.1	71.4	55.4	57.7	66.1	67.1
	0.36	0.0	0.0	75.5	76.1	66.5	68.9	57.9	63.6	67.3	70.0
FEVRIER	0.00	69.6	63.2	54.7	64.4	56.9	60.6	45.7	45.7	54.8	57.6
	0.36	67.0	61.0	56.7	68.0	54.8	59.6	44.4	45.4	54.2	58.2
MARS	0.00	49.1	62.4	53.4	63.6	49.7	56.3	39.1	48.5	48.0	57.9
	0.36	52.0	66.9	58.4	70.2	50.4	59.1	41.2	51.7	50.7	62.2
AVRIL	0.00	46.6	46.6	71.1	63.2	56.4	51.1	53.0	38.8	56.4	49.6
	0.36	58.4	54.2	81.2	67.6	66.7	58.0	62.6	43.6	67.2	55.8
MAI	0.00	44.5	43.7	62.0	55.1	65.0	58.7	37.0	30.3	52.3	47.0
	0.36	57.7	53.7	69.0	57.7	70.5	60.1	48.9	36.2	62.2	52.4
JUIN	0.00	0.0	0.0	50.5	49.9	47.4	47.4	40.2	45.2	46.1	47.5
	0.36	0.0	0.0	53.5	49.3	57.5	53.4	36.1	40.6	48.5	47.5
JUILLET	0.00	67.0	42.5	63.1	40.6	61.7	46.2	62.4	39.2	63.0	42.1
	0.36	74.8	42.7	71.5	41.9	69.3	48.0	72.1	42.5	71.4	43.9
AOUT	0.00	61.7	44.2	65.1	44.9	63.8	38.7	60.0	39.3	62.8	41.2
	0.36	74.2	52.7	74.5	49.0	71.1	39.9	68.6	41.8	71.7	44.4
SEPTEMBRE	0.00	64.8	46.2	58.2	40.1	60.8	43.6	52.2	35.9	59.1	41.5
	0.36	77.3	51.6	74.3	45.7	75.4	52.1	70.2	45.6	74.5	48.9
OCTOBRE	0.00	71.8	49.5	64.2	38.5	75.8	52.2	68.5	53.5	70.1	48.3
	0.36	80.3	54.5	86.4	54.9	84.8	57.3	87.9	66.8	84.6	58.6
NOVEMBRE	0.00	71.8	59.7	67.9	52.7	69.1	50.0	82.5	67.1	72.9	57.4
	0.36	86.2	74.1	82.0	64.8	81.3	62.5	85.2	71.3	83.6	68.0
DECEMBRE	0.00	77.9	56.1	76.6	57.4	74.7	45.0	75.3	51.2	76.2	52.3
	0.36	94.4	85.6	92.7	79.2	91.2	59.3	83.3	49.0	90.4	67.6

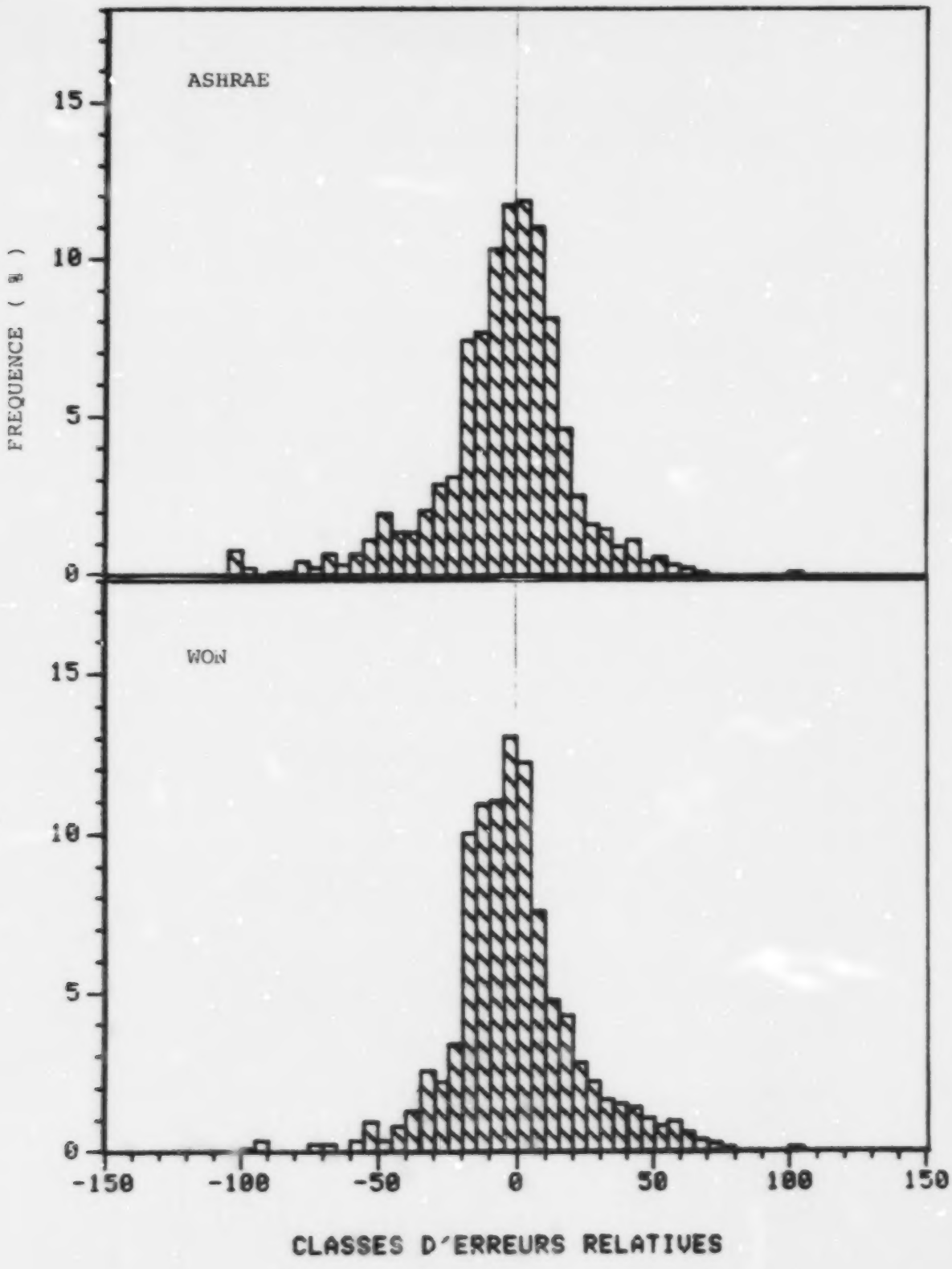


Figure 3.3 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Sept-Iles (février, seuil 0).

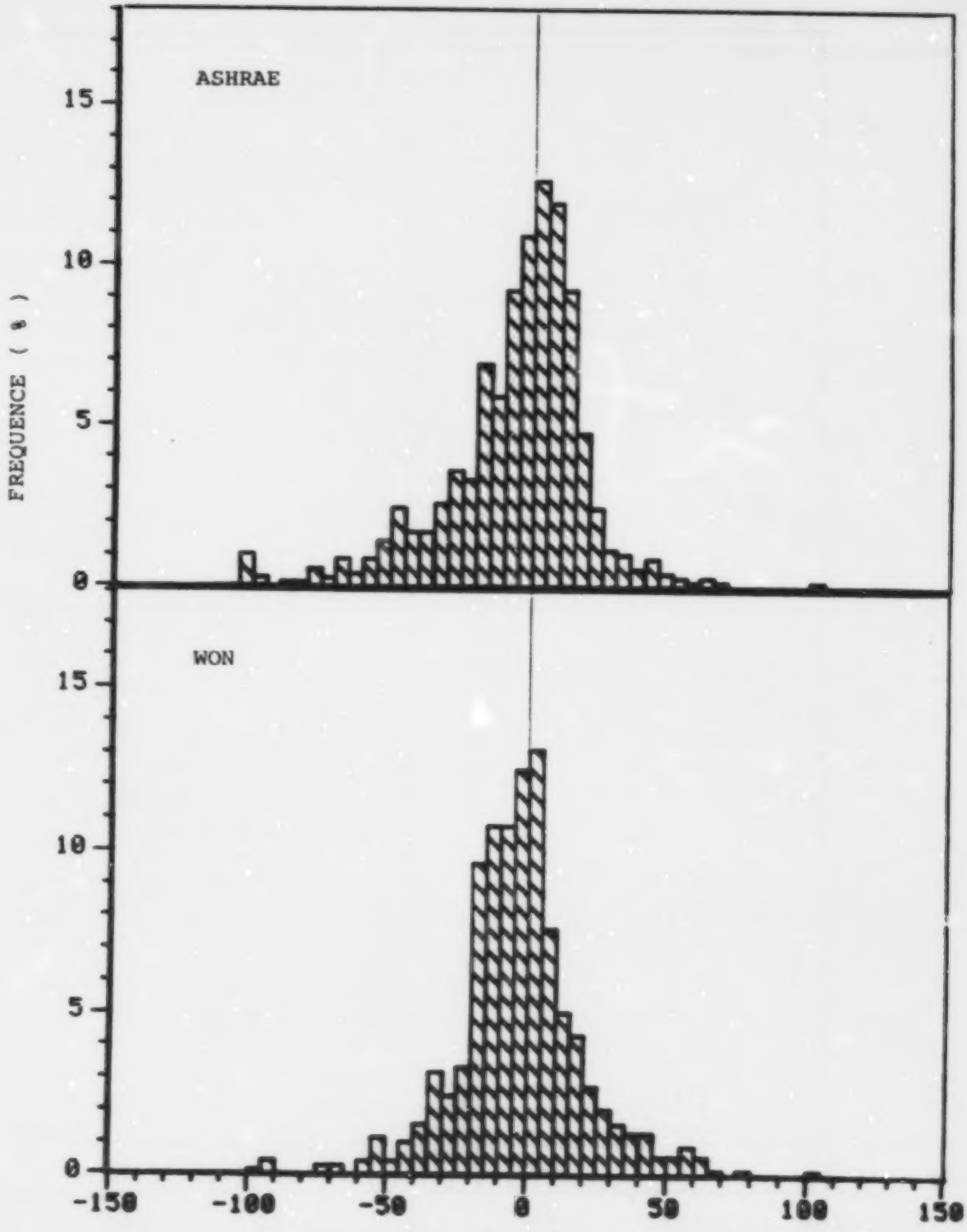


Figure 3.4 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Sept-Iles (février, seuil 0.36).

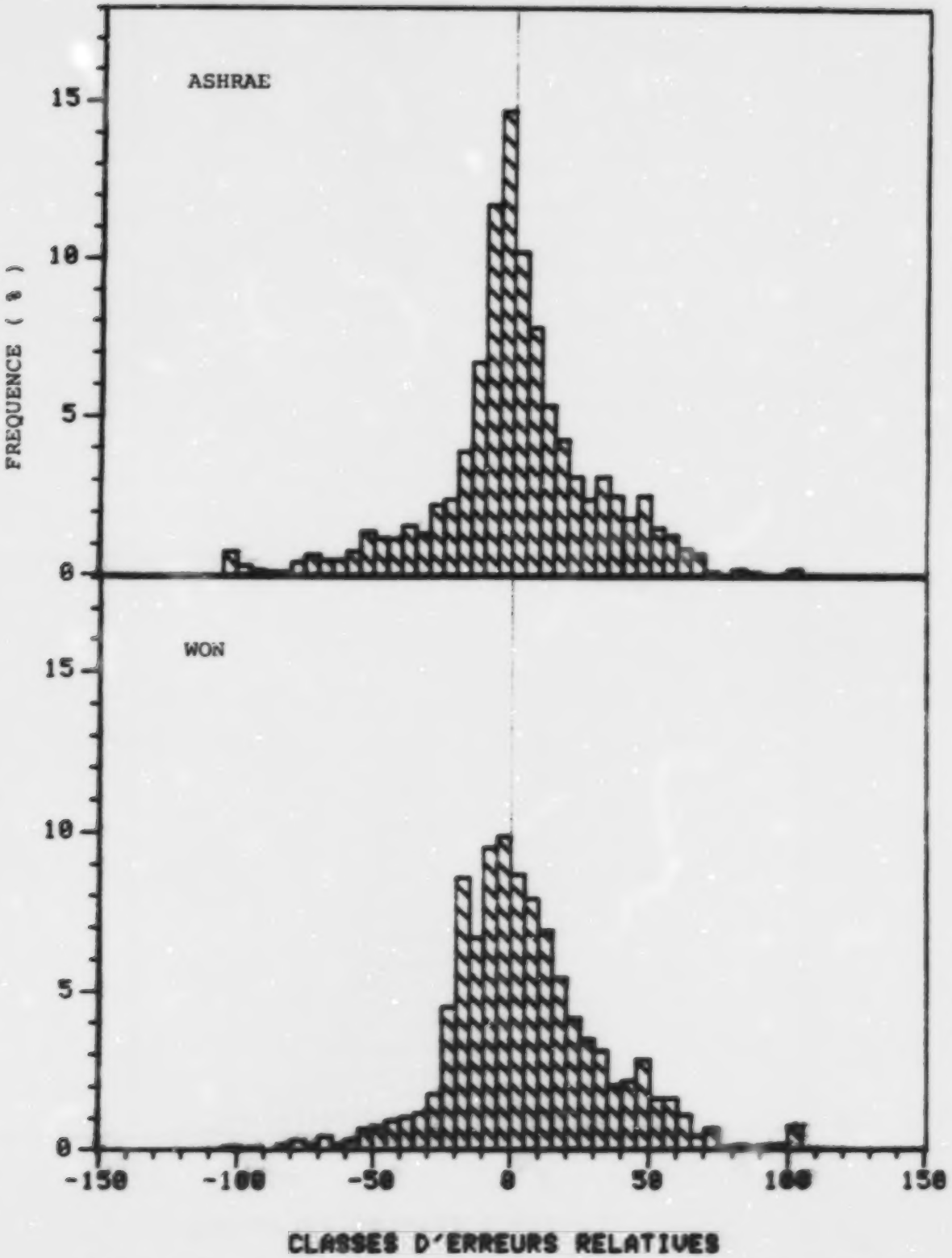


Figure 3.5 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Sept-Iles (mai, seuil 0).

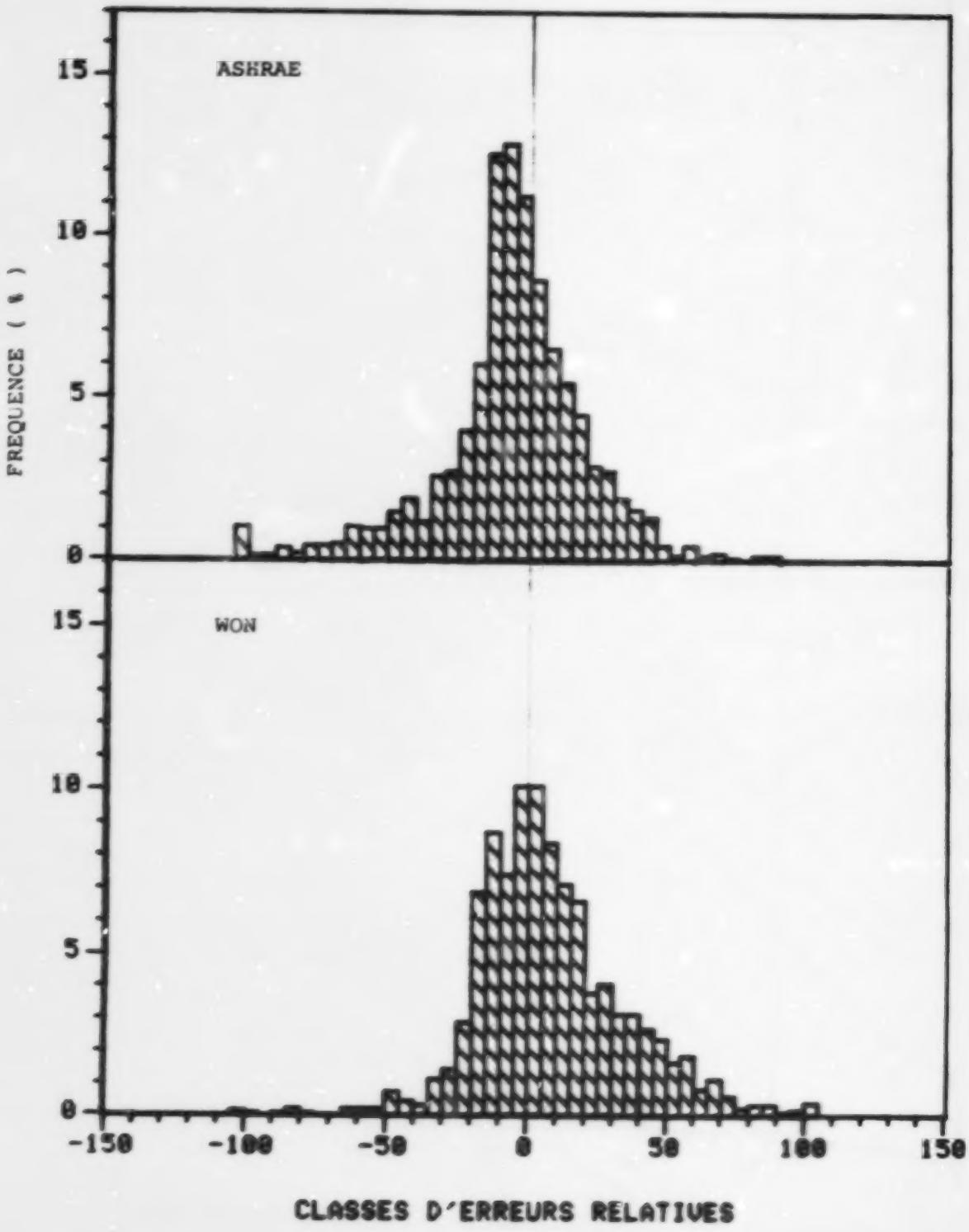


Figure 3.6 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Sept-Iles (août, seuil 0).

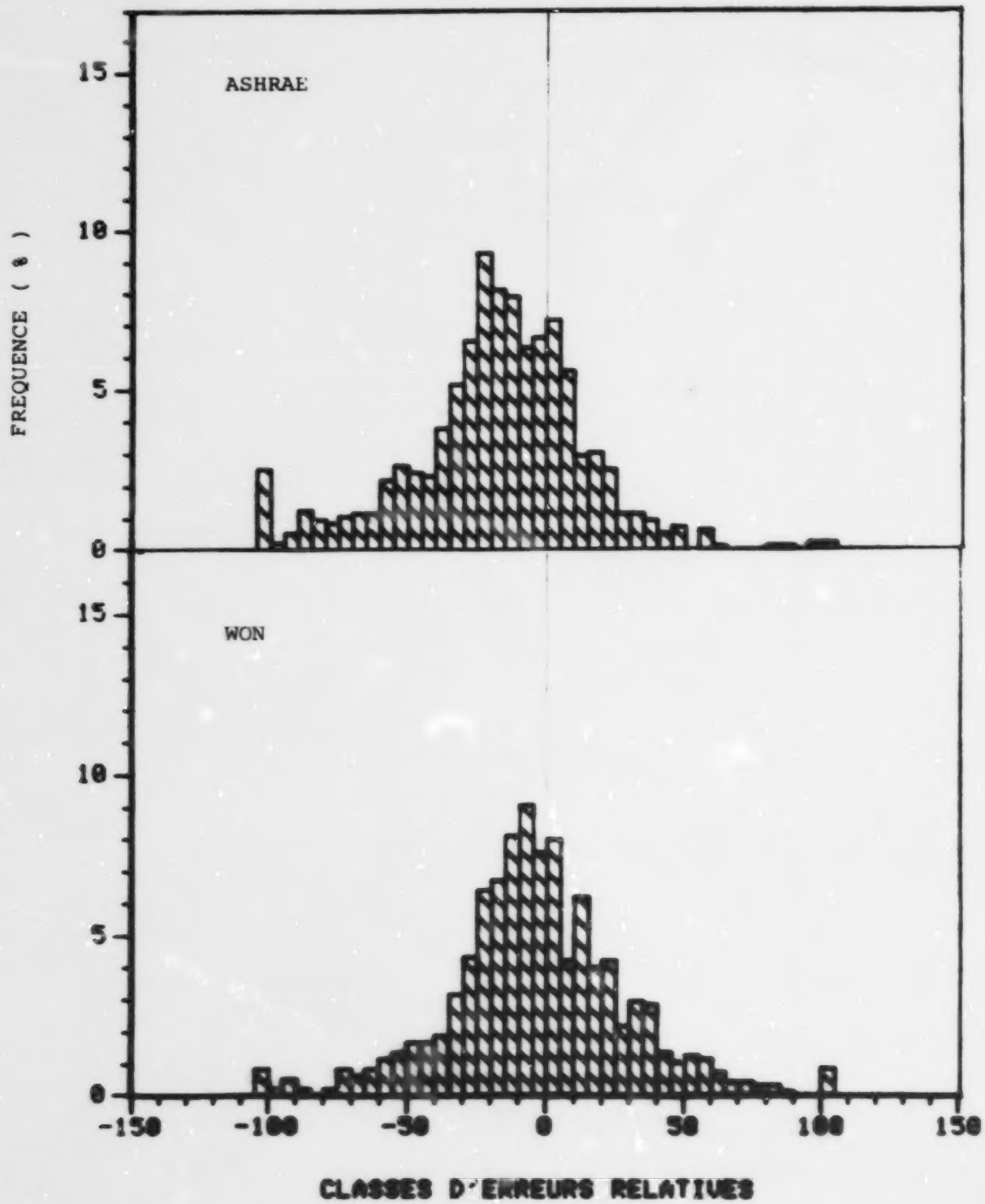


Figure 3.7 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Sept-Iles (novembre, seuil 0).

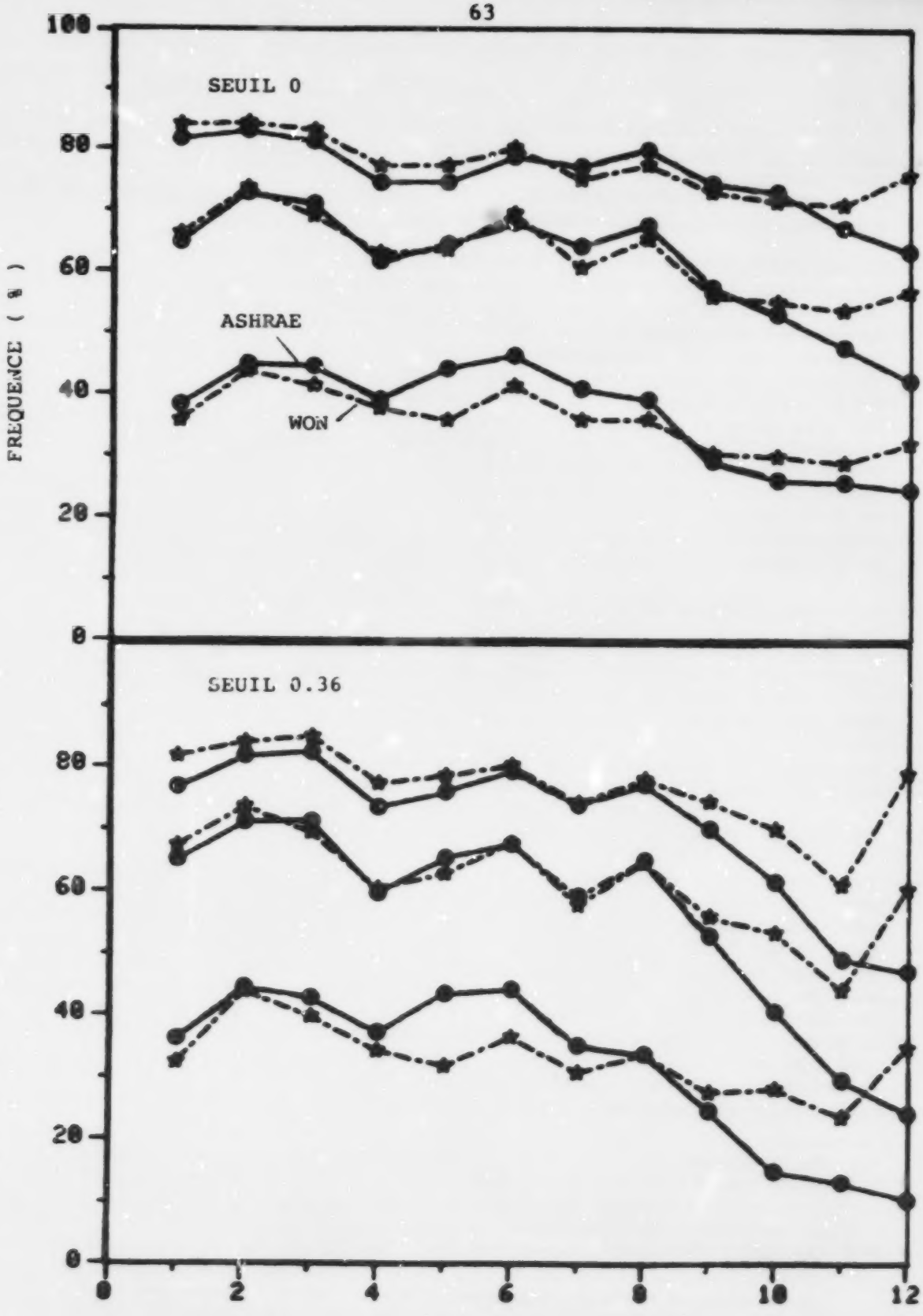


Figure 3.8 - Fréquence des erreurs relatives inférieures à 10, 20 et 30% en valeur absolue (Sept-Iles).

de constater que, pendant les huit premiers mois de l'année, les deux modèles ont une fréquence d'environ 40% d'erreurs relatives meilleures que ±10% et environ 80% d'erreurs relatives meilleures que ±30%, aussi bien avec seuil que sans (celui-ci ne faisant sentir un effet notable que pendant les trois derniers mois).

La compilation de l'analyse détaillée qui vient d'être décrite dans ce paragraphe a été effectuée mois par mois et année par année. Les résultats présentés dans ce qui suit concernent plus spécifiquement les mois de décembre-janvier-février qui forment la période la plus froide de l'hiver, donc où une bonne précision sur le calcul de rendement des systèmes de chauffage solaire est essentielle. Pour chacun des deux critères principaux (erreur RMS et tendance à la sous-estimation), et pour les cas sans seuil ou avec seuil, la compilation faisant l'objet du tableau 3.4[1] permet de savoir quel est le modèle qui s'est le mieux comporté pendant les quatre années de la période d'étude (1973-1976). On remarque ainsi au tableau 3.4 que, pour le mois de décembre, le modèle de Won obtient la meilleure performance sur l'ensemble des critères pour chacune des quatre années. Pour les deux autres mois, le modèle de l'ASHRAE s'avère supérieur quant à la sous-estimation.

3.5.1.2 Résultats en fonction de l'heure du jour

La même étude détaillée qui a fait l'objet du paragraphe 3.5.1.1 a également été entreprise en considérant chacune des heures spécifiquement, de façon à pouvoir décrire le comportement des modèles au cours d'une journée moyenne. Une tendance à obtenir un comportement saisonnier comparable pour chaque station ayant été constatée, les résultats seront présentés uniquement sous forme graphique pour quelques mois représentatifs. Pour ne pas alourdir la discussion, seule l'erreur RMS_h (formule 3.9) sera considérée, les autres critères de comparaison s'étant avérés moins discriminants à ce niveau.

Pour Sept-Iles, les variations horaires de l'erreur RMS sont présentées aux figures 3.9 et 3.10 pour les mois de janvier, février, mai et décembre, en comparant les résultats avec seuil et sans seuil. On remarquera que, d'une manière générale, le modèle de Won a tendance à moins bien estimer le rayonnement global pour des hauteurs solaires faibles que celui de l'ASHRAE. Par contre, en milieu de journée - donc pour des hauteurs solaires plus élevées - le modèle de Won reprend systématiquement l'avantage, ce qui explique d'ailleurs son meilleur résultat d'ensemble, tel que décrit au paragraphe 3.5.1.1. L'effet du seuil de 0.36 MJ m^{-2} a relativement peu d'effet sur ces comportements, en dehors du fait que l'écart entre les deux modèles est accentué en faveur de celui de Won,

---

1. Le tableau 3.4 reprend en particulier certaines informations contenues dans les tableaux 3.2 et 3.3 . Ainsi, les valeurs cumulées sur les quatre années de l'erreur RMS normalisée et de la proportion d'erreurs négatives sont rappelées entre paranthèses (première valeur: ASHRAE, deuxième valeur: Won). De plus, la proportion des erreurs relatives inférieures à 10, 20 et 30% (en valeur absolue) est indiquée pour chaque modèle, également entre parenthèses selon la même convention. Cette dernière information coïncide avec celle de la figure 3.

Tableau 3.4 - Compilation des résultats pour trois mois d'hiver à Sept-Iles.

VILLE	: SEPT-ILES	ANALYSE DES MODELES DE CALCUL DU RAYONNEMENT SOLAIRE	
PERIODE	: 1973 - 1976		
RAYONNEMENT	: GLOBAL		
MODELES	: ASHRAE & WON	IHM =	0.48 MJ/(H-M**2)
MOIS	: JANVIER		

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

	SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(H-M**2)
ERREUR RMS :	WON (26.1% , 22.5%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 3	WON (29.5% , 24.0%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 3
SOUS-ESTIMATION :	ASHRAE (66.1% , 67.1%) CONFIRME 2 ANNEES SUR 3	ASHRAE (67.3% , 70.0%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 3
ERREUR RELATIVE ABSOLUE		
INFERIEUR A 10% :	(38.2% , 35.6%)	(36.2% , 32.3%)
A 20% :	(64.7% , 66.0%)	(65.0% , 67.3%)
A 30% :	(81.6% , 84.0%)	(76.7% , 81.7%)

MODELES	: ASHRAE & WON	IHM =	0.75 MJ/(H-M**2)
MOIS	: FEVRIER		

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

	SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(H-M**2)
ERREUR RMS :	WON (25.4% , 22.3%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	WON (26.7% , 22.8%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
SOUS-ESTIMATION :	ASHRAE (54.8% , 57.6%) CONFIRME 2 ANNEES SUR 4	ASHRAE (54.2% , 58.2%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 4
ERREUR RELATIVE ABSOLUE		
INFERIEUR A 10% :	(44.8% , 43.7%)	(44.6% , 43.8%)
A 20% :	(72.7% , 73.6%)	(71.2% , 73.5%)
A 30% :	(82.9% , 84.1%)	(81.7% , 84.0%)

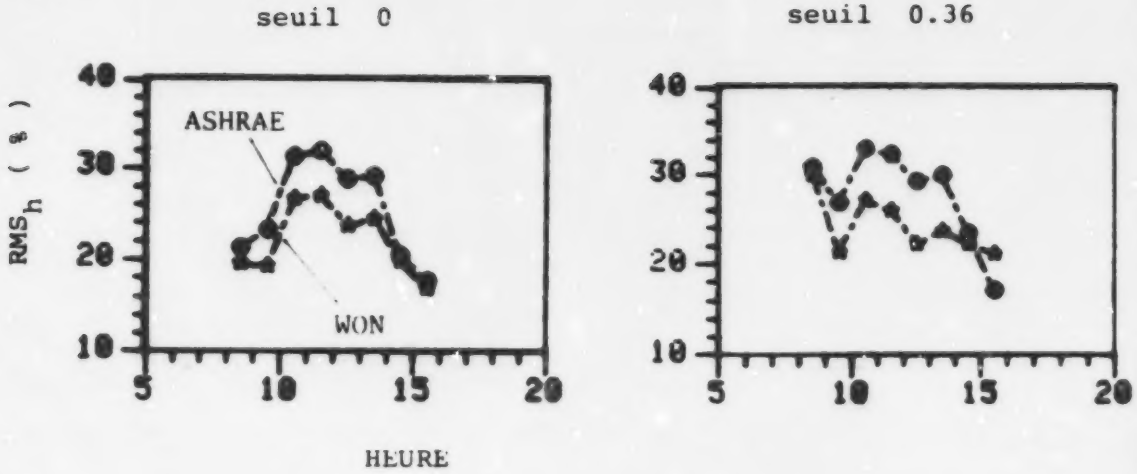
MODELES	: ASHRAE & WON	IHM =	0.38 MJ/(H-M**2)
MOIS	: DECEMBRE		

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

	SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(H-M**2)
ERREUR RMS :	WON (35.4% , 27.7%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	WON (43.5% , 28.1%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
SOUS-ESTIMATION :	WON (76.2% , 52.5%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	WON (90.4% , 67.0%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
ERREUR RELATIVE ABSOLUE		
INFERIEUR A 10% :	(24.5% , 32.0%)	(10.4% , 14.7%)
A 20% :	(42.3% , 56.7%)	(24.1% , 40.3%)
A 30% :	(63.3% , 75.9%)	(47.1% , 79.0%)

SEPT-ILES 1973 à 1976

JANVIER



FEVRIER

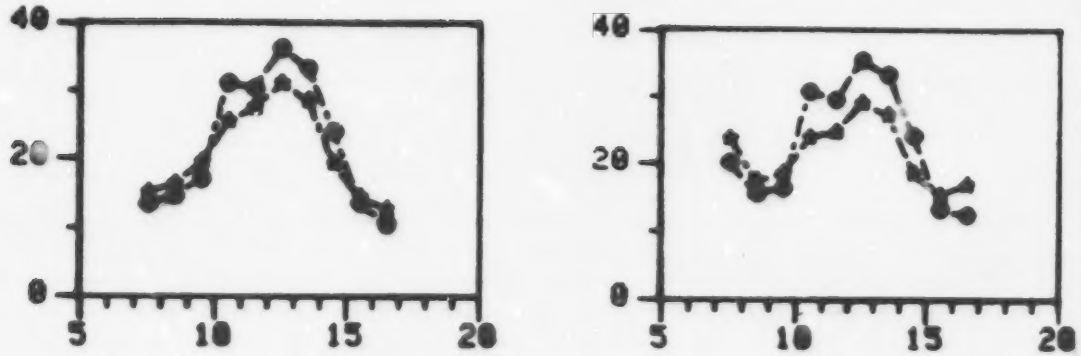


Figure 3.9 - Variation horaire de l'erreur RMS_h pour Sept-Iles

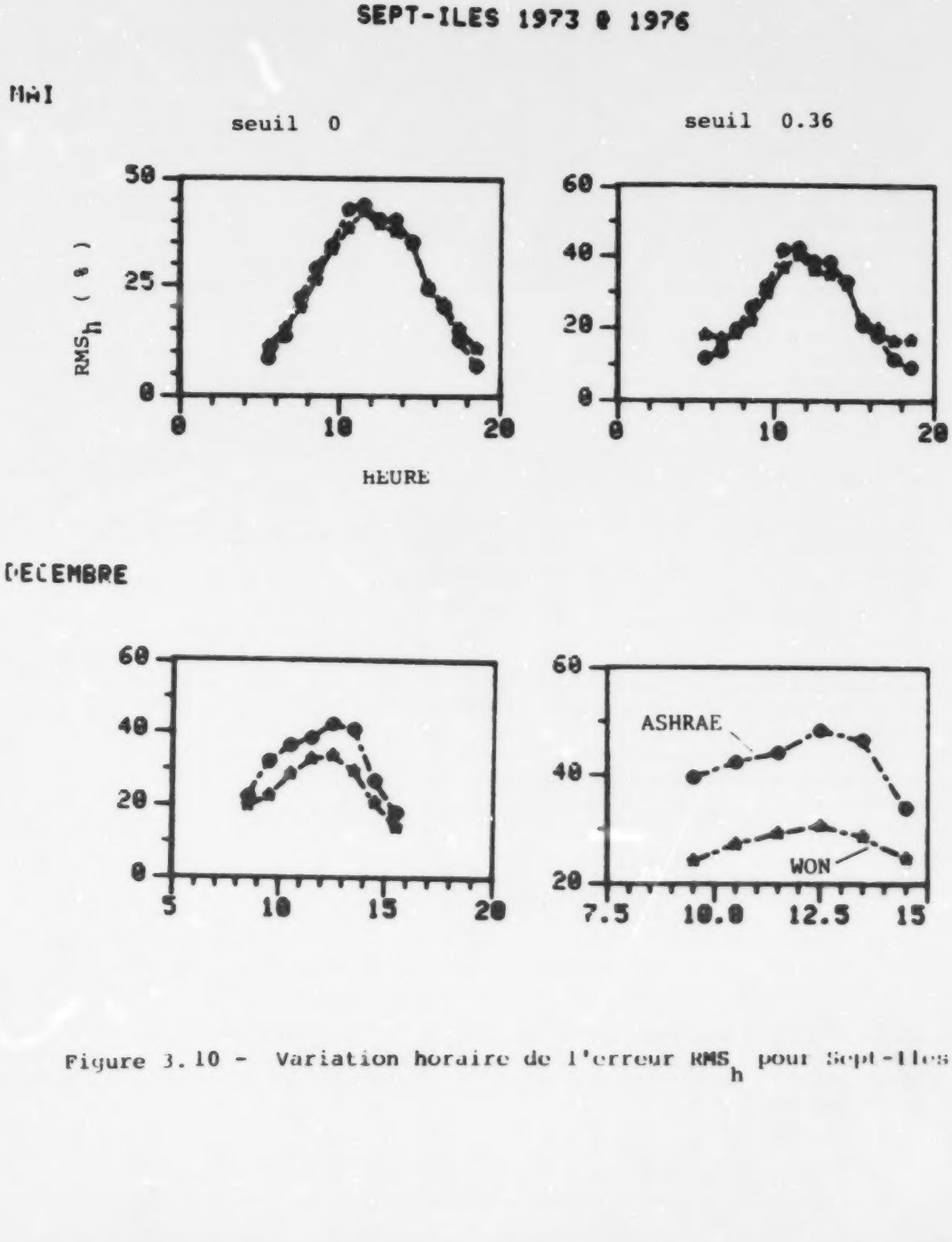


Figure 3.10 - Variation horaire de l'erreur RMS$_h$ pour Sept-Iles

comme il a déjà été mentionné.

3.5.2 Evaluation pour Ottawa

En ce qui concerne l'erreur RMS pour l'ensemble des valeurs horaires, le modèle de Won obtient un meilleur résultat que celui de l'ASHRAE pour tous les mois, sauf pour avril avec le seuil 0.36 (tableau 3.5 et figure 3.11). D'une manière générale, on peut d'ailleurs dire qu'il y a une bonne confirmation des observations faites pour Sept-Iles. On notera ainsi, en consultant les tableaux 3.5 à 3.7 et les figures 3.11 à 3.14,que le modèle de l'ASHRAE a encore un comportement erratique pendant les derniers mois de l'année: le RMS est élevé, la tendance à la sous-estimation est forte et la proportion d'erreurs "acceptables" décroît nettement, surtout en considérant le seuil de 0.36 .

On notera cependant que l'estimation est moins biaisée qu'à Sept-Iles pour le modèle de l'ASHRAE: en effet, à Ottawa, on constate que ce modèle tend à surestimer pendant la première moitié de l'année. Cette différence de comportement entre les deux stations pourrait être imputée d'une part au fait que le modèle de l'ASHRAE est en partie basé sur des données statistiques provenant justement d'Ottawa, et d'autre part à l'incertitude sur le choix du facteur de clarté C_N (équation 3.1). Celui-ci, d'après la discussion précédente, devrait idéalement être ajusté saisonnièrement de manière différente à Ottawa et à Sept-Iles.

On ne note plus dans le cas d'Ottawa ce qui a été observé à Sept-Iles quant au meilleur comportement du modèle de l'ASHRAE pour des hauteurs faibles.

3.5.3 Evaluation pour Goose Bay

Comme il apparaît au tableau 3.8 , l'erreur RMS est plus favorable au modèle de Won qu'à celui de l'ASHRAE dans tous les cas, sauf pour le mois de juillet. Les autres commentaires déjà faits pour Sept-Iles restent valables dans l'ensemble (tableaux 3.8 à 3.10, figures 3.15 à 3.18). On notera cependant que la tendance à la sous-estimation est nettement accentuée pendant toute l'année pour les deux modèles (tableau 3.9), et que la relative moins bonne performance du modèle de Won aux heures où la hauteur solaire est faible ne se fait plus sentir.

3.5.4 Evaluation pour Montréal

La performance supérieure du modèle de Won s'observe encore pour l'ensemble des indices statistiques, comme il ressort des tableaux 3.11 à 3.13 et des figures 3.19 à 3.22 : en particulier, l'erreur RMS est systématiquement inférieure (sauf en septembre), et le biais d'estimation est plus régulier pendant l'année. On retrouve évidemment des résultats assez proches de ceux d'Ottawa, du fait de la proximité de ces deux stations, et les observations déjà faites au paragraphe 3.5.2 restent valables ici.

Tableau 3.5 - Récapitulation des erreurs RMS horaires normalisées pour Ottawa.

MODELES : ASHRAE & WON
VILLE : OTTAWA

ERREUR RMS HORAIRE (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

	SEUIL	1973 ASH	1973 WON	1974 ASH	1974 WON	1975 ASH	1975 WON	1976 ASH	1976 WON	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WON
JANVIER	0.00	29.1	27.5	35.0	30.7	30.9	26.8	24.3	22.9	30.1	27.1
	0.36	30.5	28.0	38.6	33.0	31.4	27.9	24.3	22.7	31.4	28.0
FEVRIER	0.00	19.5	19.1	28.6	21.3	29.6	26.8	31.5	31.9	27.7	25.3
	0.36	19.5	18.3	29.3	19.6	30.9	26.4	31.8	28.6	28.2	23.4
MARS	0.00	30.2	26.8	23.6	22.6	25.9	23.5	25.4	25.3	26.4	24.6
	0.36	29.4	25.5	23.6	22.6	25.8	22.9	25.4	25.6	26.0	24.1
AVRIL	0.00	22.9	19.7	27.5	26.4	29.4	31.0	27.6	28.5	27.0	26.7
	0.36	19.7	18.3	27.1	28.2	30.0	32.0	28.2	29.7	26.7	27.7
MAI	0.00	34.0	30.8	38.2	35.1	34.7	32.2	34.6	32.1	35.4	32.6
	0.36	35.0	33.8	37.7	33.3	37.1	35.0	36.5	35.3	36.6	35.6
JUIN	0.00	33.6	30.0	32.3	30.0	29.7	27.7	31.7	31.3	31.9	29.8
	0.36	34.4	31.7	32.2	31.1	29.2	28.5	31.2	31.9	31.8	30.8
JUILLET	0.00	27.0	25.3	25.7	27.6	24.0	23.2	27.6	27.2	26.1	25.9
	0.36	28.4	26.2	26.7	28.4	25.1	23.8	29.7	28.1	27.4	26.7
AOUT	0.00	28.9	22.7	23.9	24.0	25.3	22.9	27.3	25.0	26.0	23.8
	0.36	30.1	23.7	24.6	23.8	27.1	23.7	28.6	25.6	27.2	24.2
SEPTEMBRE	0.00	37.4	37.1	32.3	33.4	34.2	32.7	33.5	31.1	34.4	33.6
	0.36	39.2	38.8	35.8	36.2	38.8	36.2	35.6	31.9	37.4	35.9
OCTOBRE	0.00	28.2	26.5	31.9	27.8	29.0	29.3	32.0	26.8	30.3	27.6
	0.36	31.9	28.2	36.3	30.4	33.4	30.7	36.9	29.1	34.8	29.6
NOVEMBRE	0.00	38.8	38.8	38.6	37.4	34.2	33.2	46.6	41.0	39.8	37.7
	0.36	51.8	48.0	48.0	44.4	41.2	35.8	55.0	46.8	49.5	44.0
DECEMBRE	0.00	44.0	32.1	51.2	37.7	35.6	28.8	52.6	36.3	46.2	33.9
	0.36	62.8	39.1	70.2	43.7	42.8	32.8	63.3	40.0	59.8	38.8

Tableau 3.6 - Récapitulation des fréquences d'erreurs négatives (sous-estimation) pour Ottawa.

DDELES : ASHRAE & WON
ILLE : CTTAWA

PROPORTION DES ERREURS HORAIRES NEGATIVES (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

	SEUIL	1973 ASH	1973 WON	1974 ASH	1974 WON	1975 ASH	1975 WON	1976 ASH	1976 WCN	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WON
JANVIER	0.00	44.0	50.0	56.6	62.1	37.1	41.9	41.4	46.1	44.7	49.9
	0.36	54.2	64.7	63.2	71.1	44.2	50.6	41.0	46.8	50.3	57.9
FEVRIER	0.00	36.8	51.5	57.8	65.4	47.2	52.7	48.7	47.2	47.6	54.2
	0.36	34.2	54.3	60.1	69.5	47.4	54.7	56.4	54.2	49.6	58.5
MARS	0.00	29.7	40.3	33.7	50.3	36.1	53.3	47.9	59.6	36.9	52.4
	0.36	35.7	48.7	36.5	63.1	37.1	58.4	52.5	64.5	40.6	59.1
AVRIL	0.00	28.2	40.9	42.9	55.1	47.5	56.6	50.8	63.2	42.4	54.0
	0.36	32.9	48.1	53.1	64.9	48.7	56.9	54.0	65.4	47.3	58.9
MAI	0.00	35.7	50.2	38.0	48.2	30.0	50.7	45.1	61.4	37.2	52.6
	0.36	41.4	56.3	48.3	56.8	27.5	49.1	50.5	66.6	41.5	57.0
JUIN	0.00	31.2	44.8	35.3	51.0	23.1	45.9	37.6	56.0	31.9	49.4
	0.36	37.1	48.7	40.3	55.9	26.8	51.0	43.9	60.4	37.1	54.1
JUILLET	0.00	50.9	52.1	55.4	54.0	41.2	47.2	56.5	52.5	51.0	51.4
	0.36	54.9	53.2	58.7	53.7	43.3	44.7	64.6	57.4	55.2	52.1
AOUT	0.00	40.6	45.1	59.0	53.2	53.5	48.8	59.3	55.5	55.1	51.6
	0.36	43.7	49.4	60.4	53.2	55.0	48.0	65.4	59.9	58.0	53.1
SEPTEMBRE	0.00	46.3	41.2	51.5	43.0	50.0	41.3	66.4	58.4	53.6	47.3
	0.36	49.4	41.9	61.2	55.7	60.4	47.8	79.0	67.3	62.5	53.2
OCTOBRE	0.00	47.8	39.9	65.4	46.0	51.9	38.4	65.2	56.5	57.7	45.3
	0.36	50.5	41.3	74.0	51.1	60.9	42.0	73.6	64.5	65.1	50.0
NOVEMBRE	0.00	50.9	39.2	69.2	56.4	59.1	43.8	68.8	54.2	62.0	48.4
	0.36	68.2	58.2	84.3	73.9	64.9	57.3	77.5	64.4	74.2	63.7
DECEMBRE	0.00	79.4	48.0	83.3	61.9	83.5	50.8	82.9	62.8	82.3	55.9
	0.36	92.6	73.7	89.7	78.4	86.9	47.6	89.8	70.1	89.5	66.2

Tableau 3.7 - Compilation des résultats pour trois mois d'hiver à Ottawa.

VILLE : OTTAWA
PERIODE : 1973 - 1976
RAYONNEMENT : GLOBAL
MODELES : ASHRAE & WON
MOIS : JANVIER

ANALYSE DES MODELES DE CALCUL DU RAYONNEMENT SOLAIRE

IHM = 0.56 MJ/(H-M**2)

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

	SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(H-M**2)
ERREUR RMS :	WON (30.1% , 27.1%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	WON (31.4% , 28.0%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
SOUS-ESTIMATION :	ASHRAE (44.7% , 49.9%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	ASHRAE (50.3% , 57.9%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
ERREUR RELATIVE ABSOLUE		
INFERIEUR A 10% :	(35.4% , 38.7%)	(33.6% , 37.4%)
A 20% :	(62.2% , 65.0%)	(59.6% , 63.1%)
A 30% :	(75.1% , 78.6%)	(74.1% , 79.0%)

MODELES : ASHRAE & WON
MOIS : FEVRIER

IHM = 0.84 MJ/(H-M**2)

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

	SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(H-M**2)
ERREUR RMS :	WON (27.7% , 25.3%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 4	WON (28.2% , 23.4%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
SOUS-ESTIMATION :	ASHRAE (47.6% , 54.2%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 4	ASHRAE (49.6% , 58.5%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 4
ERREUR RELATIVE ABSOLUE		
INFERIEUR A 10% :	(45.0% , 48.3%)	(44.3% , 48.3%)
A 20% :	(69.1% , 72.0%)	(69.8% , 73.8%)
A 30% :	(78.9% , 82.8%)	(79.8% , 85.5%)

MODELES : ASHRAE & WON
MOIS : DECEMBRE

IHM = 0.43 MJ/(H-M**2)

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

	SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(H-M**2)
ERREUR RMS :	WON (46.2% , 33.9%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	WON (59.8% , 38.8%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
SOUS-ESTIMATION :	WON (82.3% , 55.9%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	WON (89.5% , 66.2%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
ERREUR RELATIVE ABSOLUE		
INFERIEUR A 10% :	(19.6% , 28.9%)	(7.4% , 22.1%)
A 20% :	(39.1% , 51.8%)	(17.9% , 42.9%)
A 30% :	(52.5% , 69.4%)	(28.6% , 61.6%)

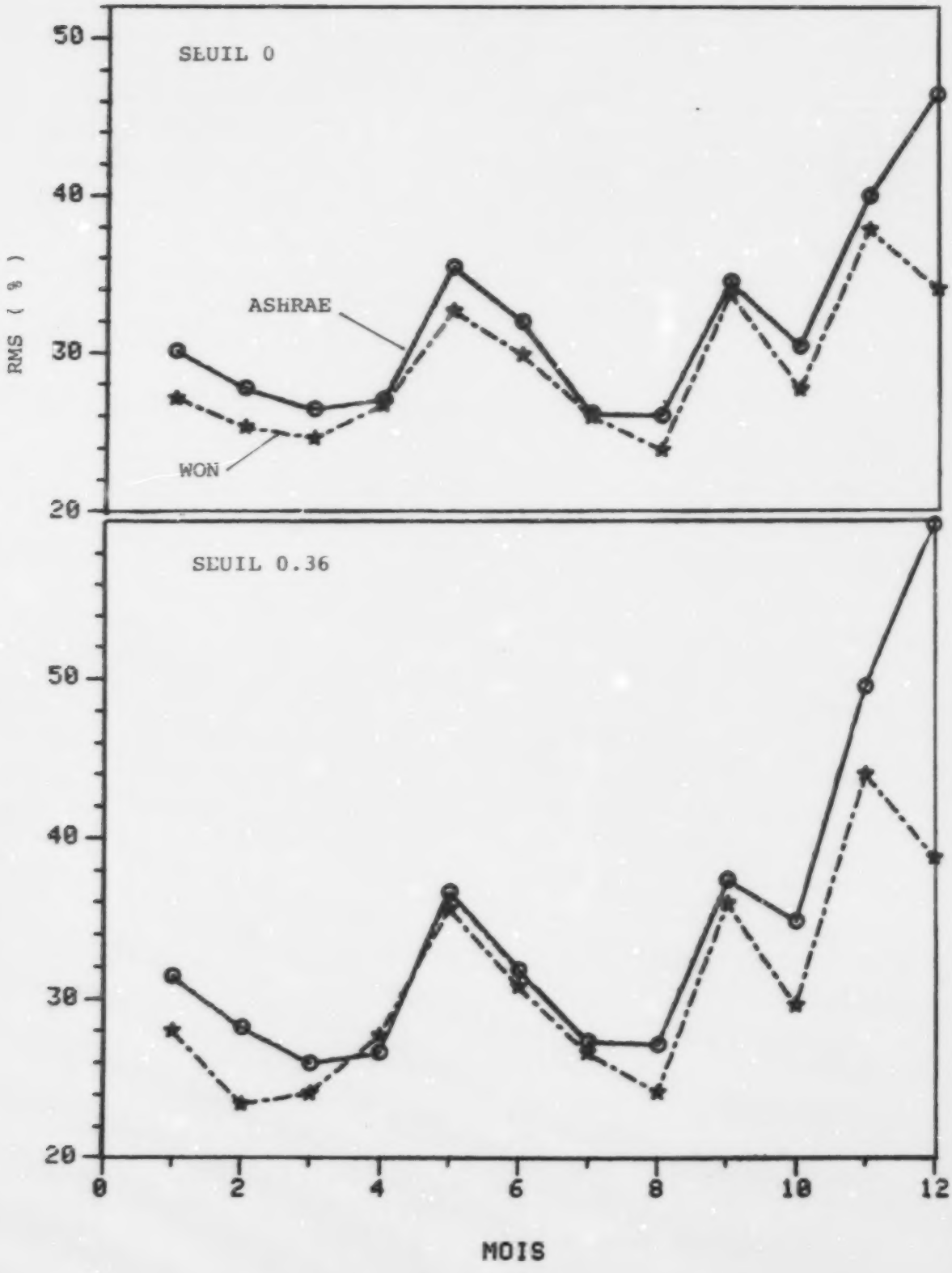


Figure 3.11 - Variation mensuelle de l'erreur RMS pour Ottawa.

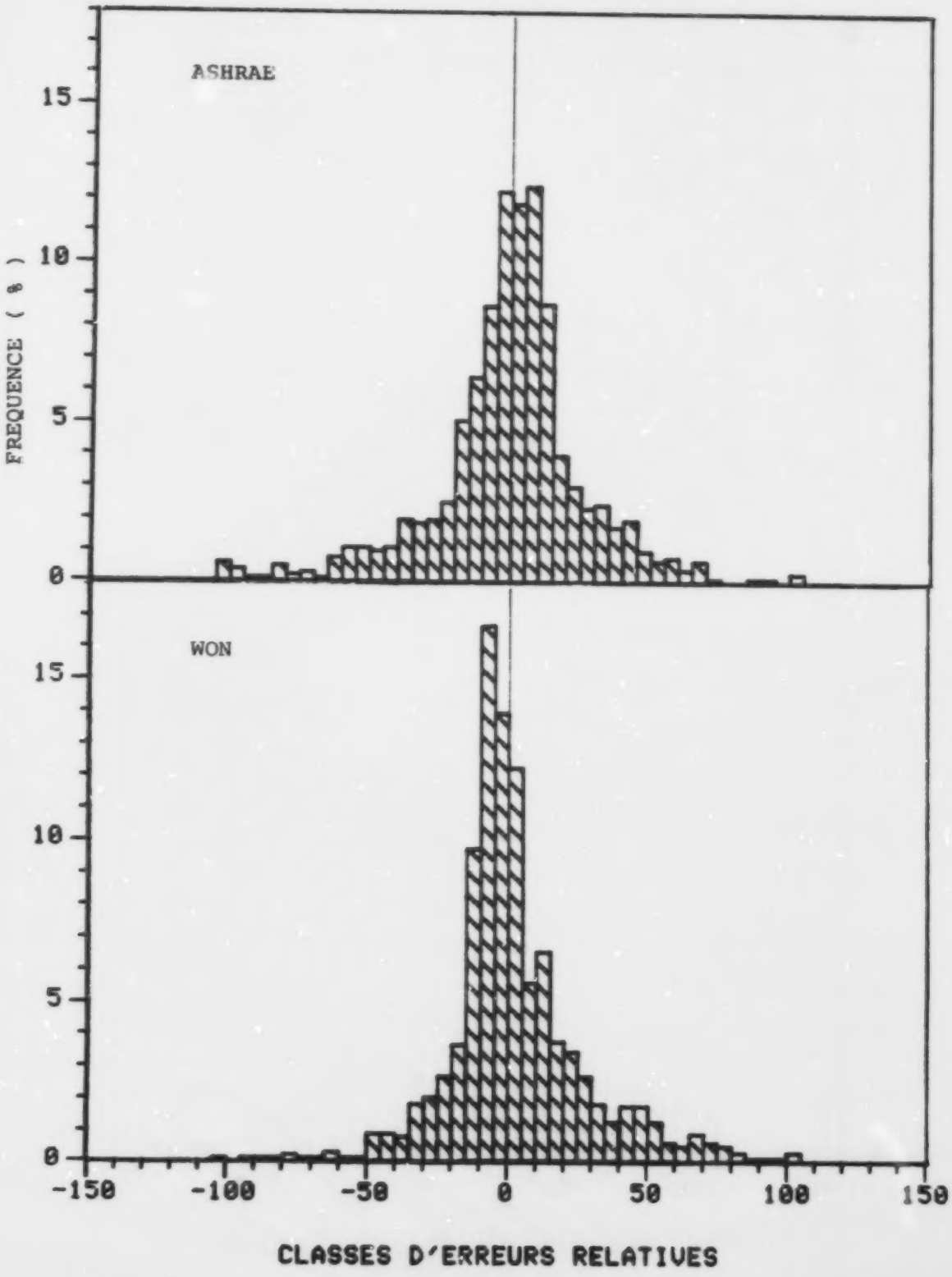


Figure 3.12 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Ottawa (février, seuil 0).

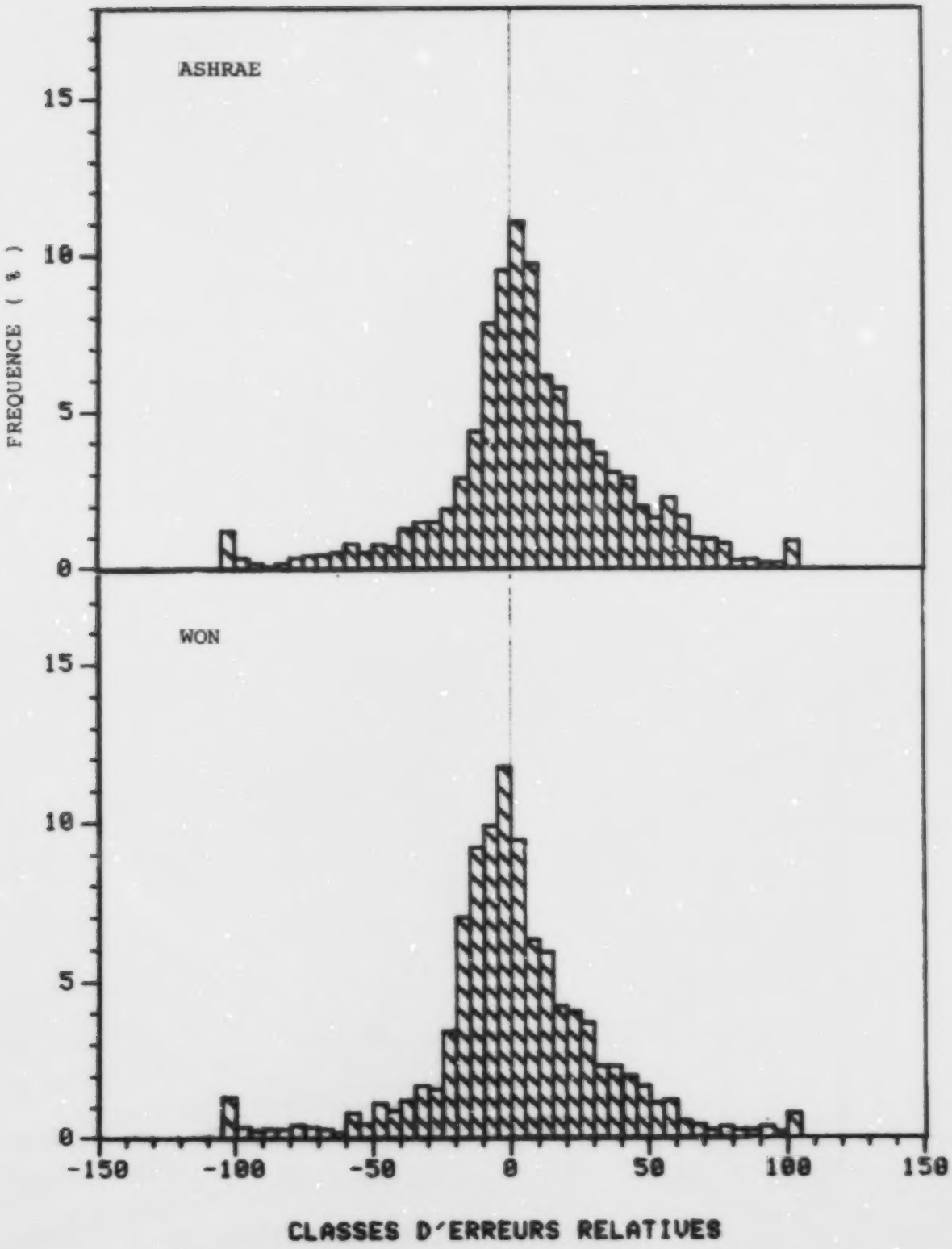


Figure 3.13 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Ottawa (mai, seuil 0).

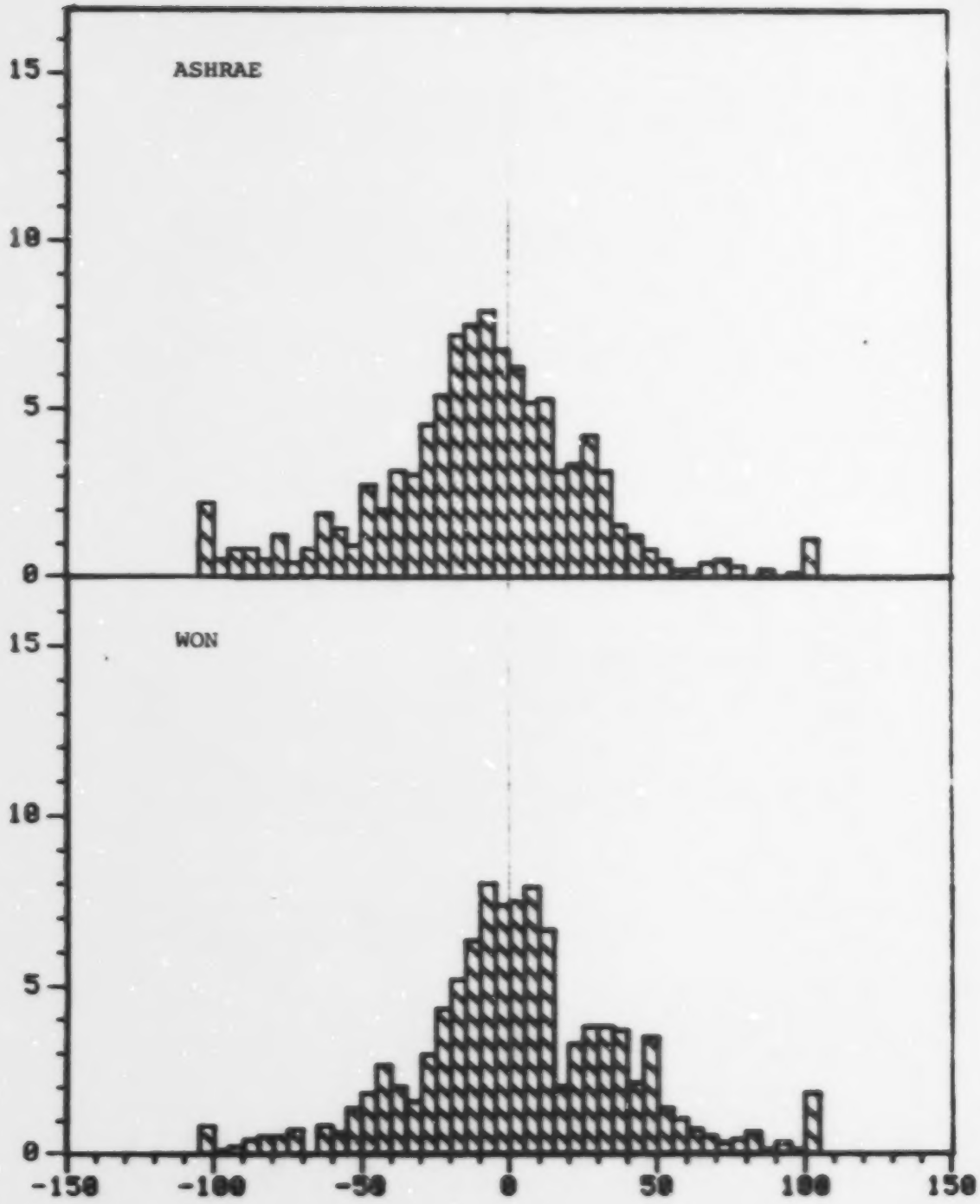


Figure 3.14 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relaives pour Ottawa (novembre, seuil 0).

Tableau 3.8 - Récapitulation des erreurs RMS horaires normalisées pour Goose Bay.

MODELES : ASHRAE & WON
VILLE : GOOSE BAY

ERREUR RMS HORAIRE (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

	SEUIL	1973 ASH	1973 WON	1974 ASH	1974 WON	1975 ASH	1975 WON	1976 ASH	1976 WON	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WON
JANVIER	0.00	32.0	30.4	34.3	29.5	27.6	24.2	28.1	26.3	30.8	27.9
	0.36	36.6	35.0	37.1	31.3	30.9	26.7	32.0	29.7	34.6	31.1
FEVRIER	0.00	24.8	25.8	32.7	24.7	32.6	22.9	18.0	20.2	27.8	23.5
	0.36	28.5	29.1	36.2	26.2	34.7	23.8	18.3	20.8	30.3	24.9
MARS	0.00	20.7	21.7	27.2	21.1	26.1	20.0	23.6	20.3	24.5	20.8
	0.36	22.0	23.0	28.9	22.2	28.8	21.7	25.2	21.3	26.3	22.1
AVRIL	0.00	34.9	28.2	37.3	27.2	32.9	26.1	33.0	29.5	34.6	27.7
	0.36	38.1	30.7	39.9	29.0	36.2	28.0	36.3	32.3	37.7	30.0
MAI	0.00	29.9	29.4	36.5	30.3	28.8	27.8	32.1	33.7	32.0	30.4
	0.36	31.8	31.5	39.6	32.8	30.8	29.9	33.9	36.1	34.3	32.6
JUIN	0.00	29.9	30.8	29.2	31.5	35.9	31.6	32.9	34.1	32.5	32.1
	0.36	31.3	32.9	29.3	32.5	38.6	32.9	35.7	37.3	34.4	34.2
JUILLET	0.00	31.0	33.8	0.0	0.0	31.2	34.9	32.4	36.4	31.5	35.1
	0.36	35.1	36.5	0.0	0.0	34.6	36.8	36.4	38.5	35.4	37.3
AOUT	0.00	39.1	30.9	0.0	0.0	35.2	30.5	35.6	33.4	36.6	31.6
	0.36	43.1	33.0	0.0	0.0	39.4	31.8	39.7	34.4	40.8	33.0
SEPTEMBRE	0.00	46.1	40.5	0.0	0.0	36.8	37.4	42.2	42.8	41.7	40.3
	0.36	51.3	43.7	0.0	0.0	42.7	38.8	50.7	47.4	48.4	43.4
OCTOBRE	0.00	47.3	36.1	0.0	0.0	43.6	37.4	45.3	34.8	45.4	36.1
	0.36	57.4	40.0	0.0	0.0	54.0	43.8	56.8	39.9	56.1	41.3
NOVEMBRE	0.00	48.8	36.1	0.0	0.0	46.3	37.5	46.3	34.4	47.1	36.0
	0.36	68.3	47.4	0.0	0.0	63.4	46.6	61.4	44.9	64.3	46.2
DECEMBRE	0.00	55.6	39.5	51.8	33.9	49.6	31.5	49.2	34.7	51.3	35.1
	0.36	70.1	51.1	62.4	41.8	59.2	38.6	63.0	42.8	63.8	43.9

Tableau 3.9 - Récapitulation des fréquences d'erreurs négatives (sous-estimation) pour Goose Bay.

MODELES : ASHRAE & WON
VILLE : GOOSE BAY

PROPORTION DES ERREURS HORAIRES NEGATIVES (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

	SEUIL	1973		1974		1975		1976		1973 - 1976	
		ASH	WON	ASH	WON	ASH	WON	ASH	WON	ASH	WON
JANVIER	0.00	90.5	86.2	91.4	91.4	82.7	78.2	78.9	74.1	85.2	82.9
	0.36	93.5	88.5	91.0	92.8	88.5	82.0	84.3	81.5	89.7	86.9
FEVRIER	0.00	77.7	74.3	82.1	80.8	77.7	76.0	72.4	72.0	77.5	76.6
	0.36	84.0	79.6	84.3	81.5	74.8	76.2	73.2	72.1	78.7	77.2
MARS	0.00	71.3	79.5	77.4	70.6	66.2	70.2	58.3	65.1	68.3	71.4
	0.36	70.6	79.2	76.5	71.2	67.7	71.5	58.9	65.8	69.2	72.9
AVRIL	0.00	82.3	76.3	87.6	74.6	73.2	60.5	70.1	64.7	78.2	68.8
	0.36	85.5	76.0	89.9	73.7	82.5	62.9	78.0	65.5	83.3	69.6
MAI	0.00	53.7	58.7	77.3	67.5	61.1	54.7	49.8	49.5	60.6	57.5
	0.36	58.9	60.8	81.1	67.2	66.2	58.7	56.5	53.2	66.1	59.3
JUIN	0.00	45.5	47.0	54.7	50.9	49.2	47.1	56.4	47.4	51.1	47.8
	0.36	49.7	48.5	59.4	52.2	56.5	49.5	59.8	48.0	56.1	48.0
JUILLET	0.00	59.4	43.5	0.0	0.0	59.4	41.8	57.6	39.2	59.8	41.5
	0.36	66.2	43.9	0.0	0.0	62.2	38.9	64.1	37.9	64.2	40.3
AOUT	0.00	75.8	53.6	0.0	0.0	61.7	45.9	61.6	43.5	66.1	47.5
	0.36	80.3	53.2	0.0	0.0	72.4	50.3	74.1	50.0	75.7	51.2
SEPTEMBRE	0.00	71.8	52.6	0.0	0.0	56.3	40.2	50.9	38.7	59.0	43.3
	0.36	77.0	54.1	0.0	0.0	74.3	51.9	68.8	51.3	73.5	52.5
OCTOBRE	0.00	77.6	52.3	0.0	0.0	75.8	55.7	72.0	53.5	75.1	53.9
	0.36	85.1	62.4	0.0	0.0	83.4	64.6	84.0	59.6	84.2	61.9
NOVEMBRE	0.00	81.1	66.4	0.0	0.0	75.5	56.9	85.9	71.6	80.8	64.9
	0.36	89.5	74.7	0.0	0.0	89.0	69.1	85.0	75.7	87.7	73.0
DECEMBRE	0.00	95.0	73.9	90.7	92.0	89.9	74.7	88.4	71.8	91.0	75.3
	0.36	93.0	84.9	92.3	79.5	90.6	81.2	94.3	87.4	92.6	83.3

Tableau 3.10 - Compilation des résultats pour trois mois d'hiver à Goose Bay.

VILLE	: GOOSE BAY	ANALYSE DES MODELES DE CALCUL	
PERIODE	: 1973 - 1976	DU RAYONNEMENT SOLAIRE	
RAYONNEMENT	: GLOBAL		
MODELES	: ASHRAE & WON	IHM = 0.43 MJ/(M-M**2)	
MOIS	: JANVIER		
* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE			
	SEUIL=0.00 MJ/(M-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(M-M**2)	
ERREUR RMS :	WON	WON	
	(30.8% , 27.9%)	(34.6% , 31.1%)	
	CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	
SOUS-ESTIMATION :	WON	WON	
	(86.2% , 82.9%)	(89.7% , 86.9%)	
	CONFIRME 3 ANNEES SUR 4	CONFIRME 3 ANNEES SUR 4	
ERREUR RELATIVE ABSOLUE			
INFERIEUR A 10% :	(17.0% , 20.8%)	(10.7% , 13.9%)	
A 20% :	(40.1% , 42.1%)	(31.2% , 32.0%)	
A 30% :	(72.0% , 75.4%)	(64.3% , 67.5%)	
MODELES	: ASHRAE & WON	IHM = 0.66 MJ/(M-M**2)	
MOIS	: FEVRIER		
* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE			
	SEUIL=0.00 MJ/(M-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(M-M**2)	
ERREUR RMS :	WON	WON	
	(27.8% , 23.5%)	(30.3% , 24.9%)	
	CONFIRME 2 ANNEES SUR 4	CONFIRME 2 ANNEES SUR 4	
SOUS-ESTIMATION :	WON	WON	
	(77.5% , 76.6%)	(78.7% , 77.2%)	
	CONFIRME 3 ANNEES SUR 4	CONFIRME 3 ANNEES SUR 4	
ERREUR RELATIVE ABSOLUE			
INFERIEUR A 10% :	(39.5% , 29.0%)	(36.8% , 25.1%)	
A 20% :	(66.3% , 63.4%)	(62.8% , 60.2%)	
A 30% :	(79.2% , 86.0%)	(74.2% , 83.5%)	
MODELES	: ASHRAE & WON	IHM = 0.31 MJ/(M-M**2)	
MOIS	: DECEMBRE		
* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE			
	SEUIL=0.00 MJ/(M-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(M-M**2)	
ERREUR RMS :	WON	WON	
	(51.3% , 35.1%)	(63.8% , 43.9%)	
	CONFIRME 3 ANNEES SUR 4	CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	
SOUS-ESTIMATION :	WON	WON	
	(91.0% , 79.3%)	(92.6% , 83.3%)	
	CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	
ERREUR RELATIVE ABSOLUE			
INFERIEUR A 10% :	(12.5% , 28.8%)	(6.8% , 8.9%)	
A 20% :	(22.5% , 38.3%)	(9.8% , 20.5%)	
A 30% :	(35.0% , 58.1%)	(16.4% , 37.8%)	

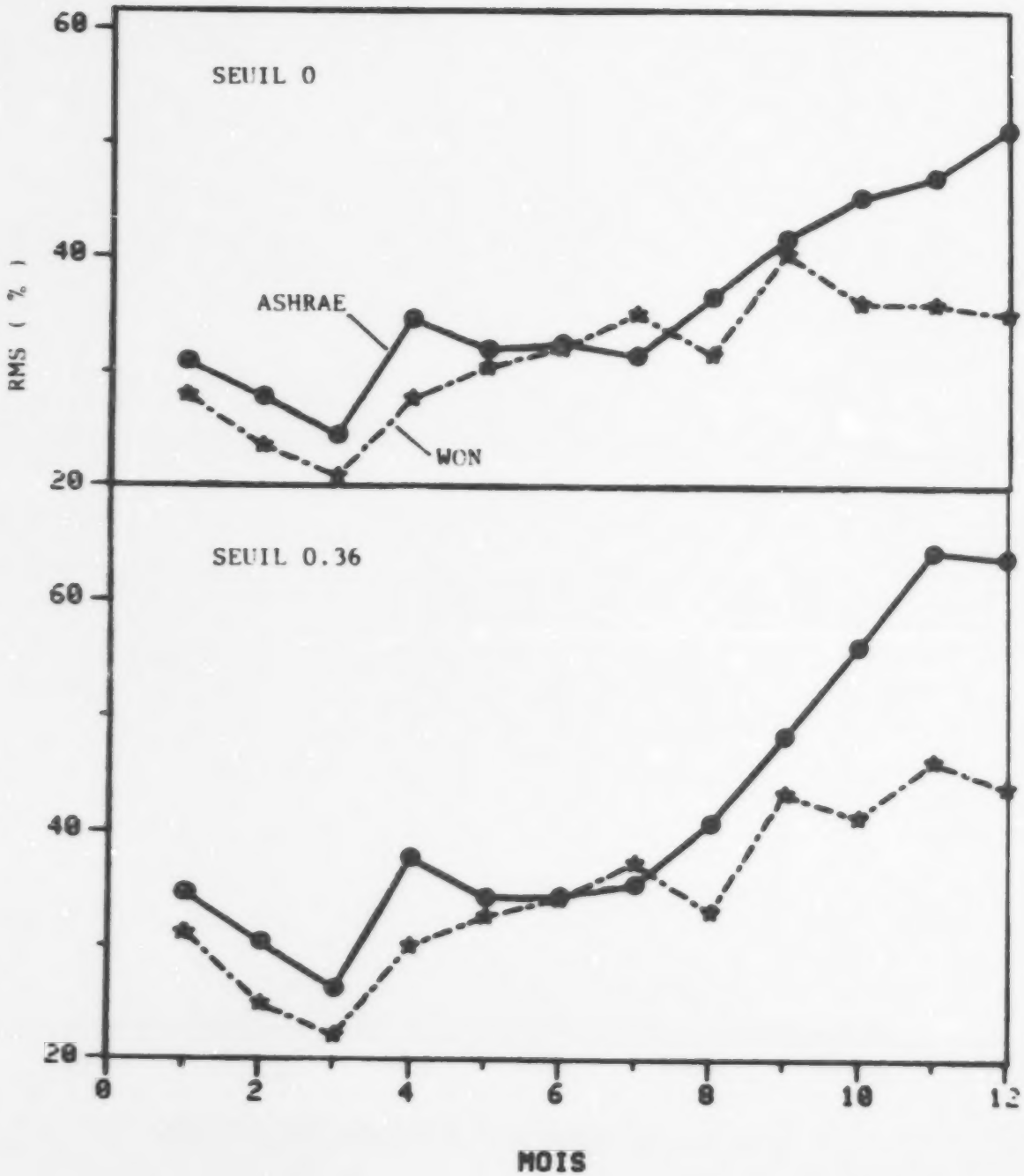


Figure 3.15 - Variation mensuelle de l'erreur RMS normalisée pour Goose Bay, 1973-1976.

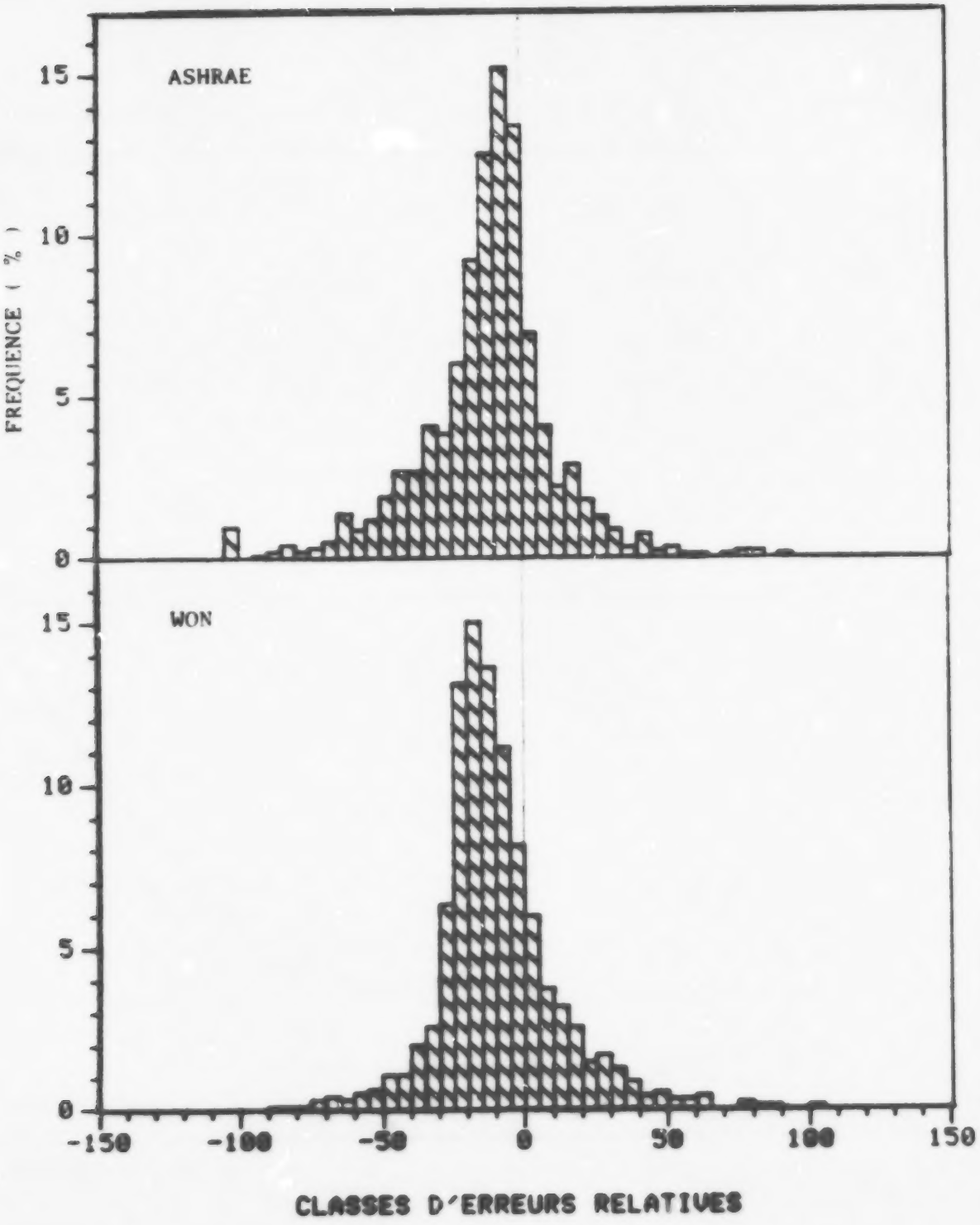


Figure 3.16 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Goose Bay (février, seuil 0).

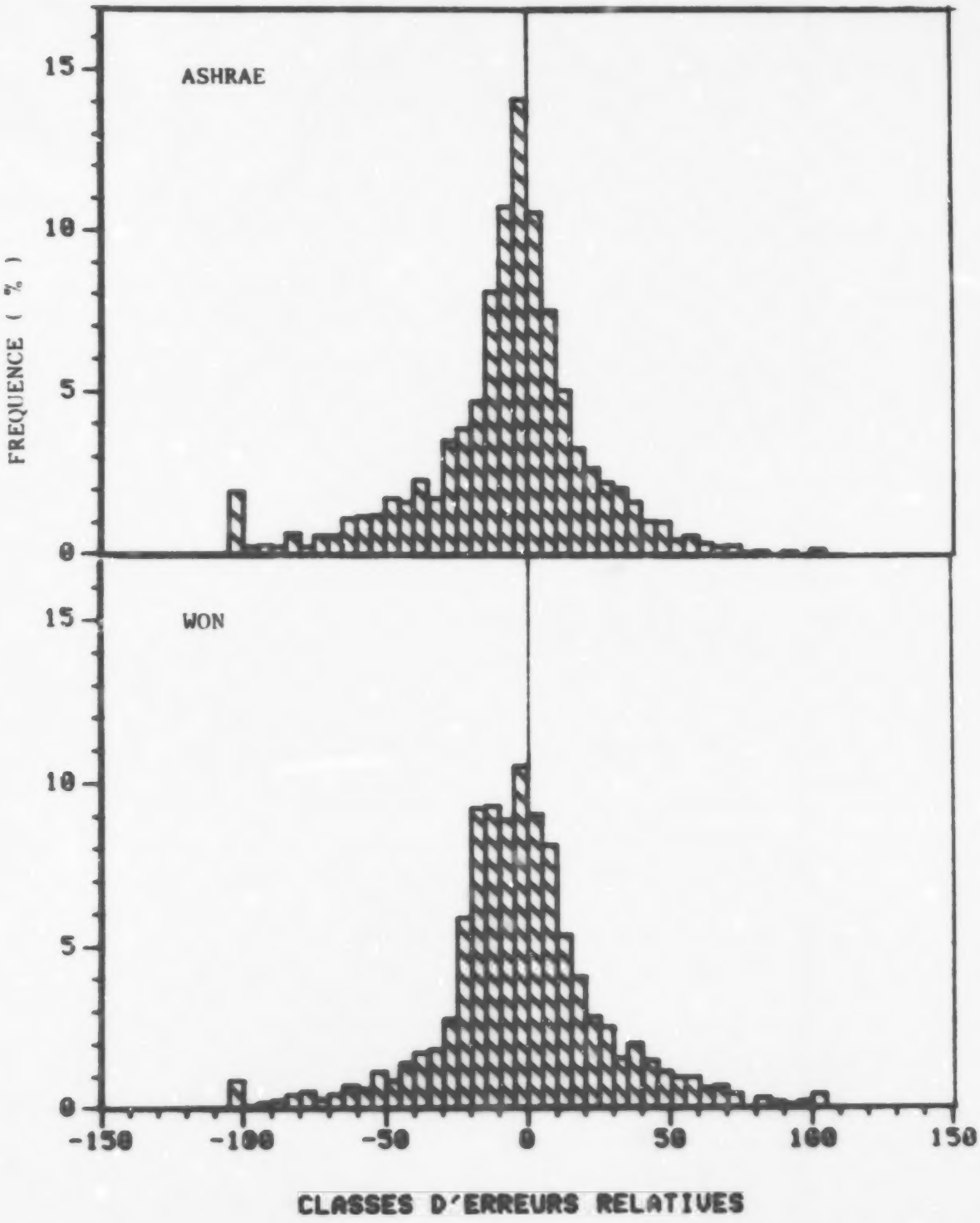


Figure 3.17 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Goose Bay (mai, seuil 0).

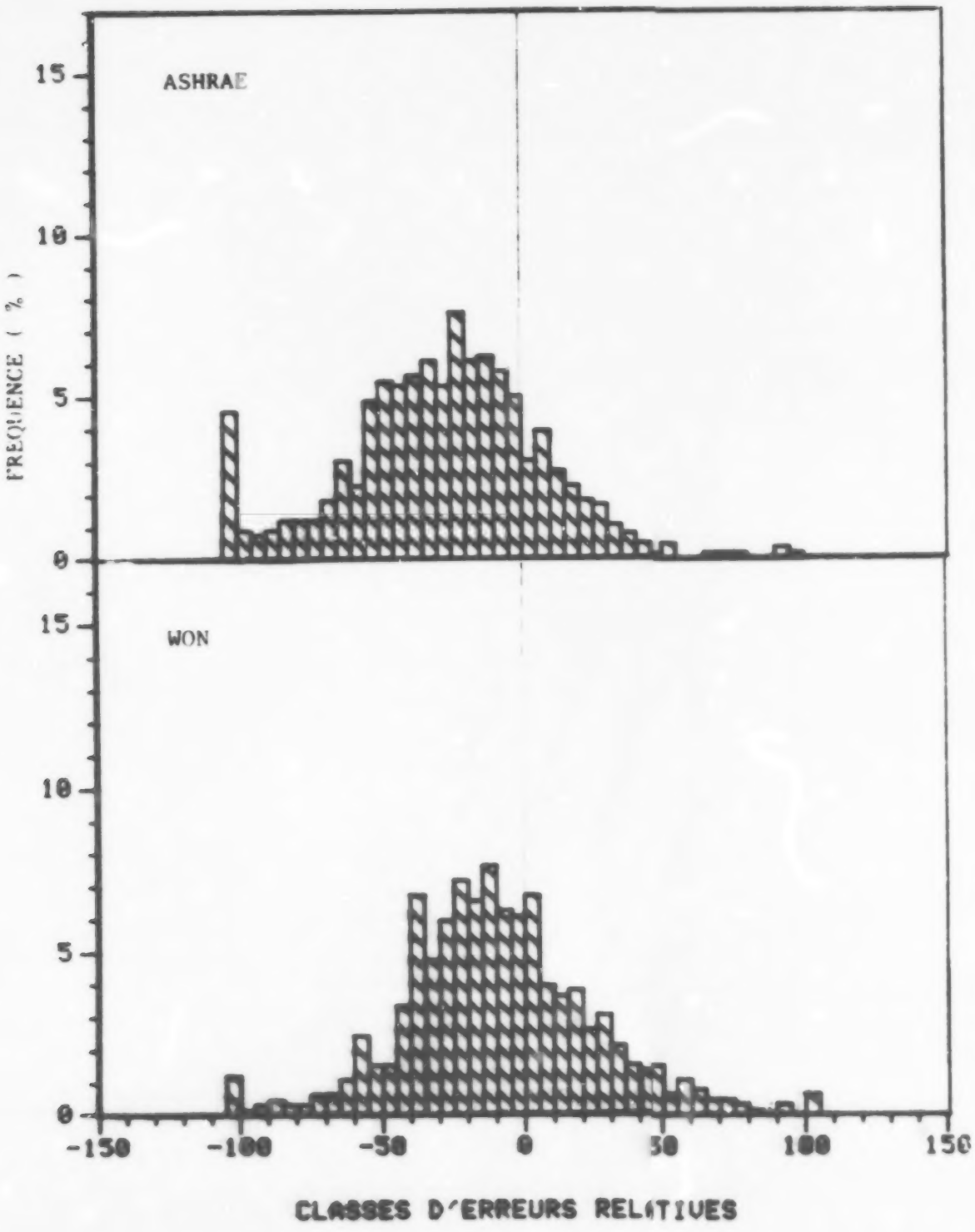


Figure 3.18 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Goose Bay (novembre, seuil 0).

Tableau 3.11 - Récapitulation des erreurs RMS horaires normalisées pour Montréal.

MODELES : ASHRAE & WON
VILLE : MONTREAL

ERREUR RMS HORAIRE (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

		1973		1974		1975		1976		1973 - 1976	
	SEUIL	ASH	WON	ASH	WON	ASH	WON	ASH	WON	ASH	WON
JANVIER	0.00	33.0	31.4	35.2	32.9	33.0	31.0	34.9	35.4	34.0	32.7
	0.36	33.1	31.4	36.2	32.2	34.7	31.4	36.0	37.5	35.1	33.3
FEVRIER	0.00	25.6	23.6	28.5	26.1	0.0	0.0	29.6	29.3	28.5	27.1
	0.36	25.3	21.3	29.2	25.0	0.0	0.0	29.2	25.3	28.6	24.5
MARS	0.00	34.3	29.2	31.3	28.2	0.0	0.0	31.3	29.4	32.3	29.0
	0.36	33.5	27.5	32.0	28.5	0.0	0.0	29.1	27.4	31.5	27.8
AVRIL	0.00	30.8	28.1	32.2	27.9	0.0	0.0	29.8	27.7	31.0	27.9
	0.36	30.2	29.7	31.2	29.3	0.0	0.0	29.1	28.4	30.1	29.1
MAI	0.00	35.0	29.2	36.5	33.3	0.0	0.0	34.1	29.6	35.2	30.9
	0.36	36.7	32.3	36.9	35.8	0.0	0.0	32.6	30.2	35.4	32.8
JUIN	0.00	34.9	29.5	31.5	29.3	25.8	22.0	29.9	27.2	31.1	27.7
	0.36	35.1	30.4	31.6	31.0	25.4	22.1	28.9	27.2	30.8	28.2
JUILLET	0.00	27.4	27.0	28.9	27.9	26.2	23.3	26.7	27.0	27.3	26.3
	0.36	29.1	28.5	30.8	29.1	27.6	24.2	28.3	27.9	29.0	27.5
AOUT	0.00	30.1	28.5	25.9	24.7	25.1	23.4	25.2	25.7	26.7	25.6
	0.36	32.3	30.6	27.5	24.5	26.8	24.7	27.3	26.9	28.6	26.8
SEPTEMBRE	0.00	29.4	30.2	32.4	30.9	30.1	31.1	27.5	28.7	29.9	30.2
	0.36	30.4	30.8	35.6	33.5	32.6	33.4	27.8	28.6	31.7	31.6
OCTOBRE	0.00	31.6	29.5	35.3	31.4	32.3	29.3	33.5	33.3	33.2	30.9
	0.36	37.0	32.1	40.6	34.0	37.1	29.8	40.4	38.4	38.8	33.7
NOVEMBRE	0.00	37.1	35.1	40.0	38.9	37.8	32.2	45.1	46.7	40.3	38.8
	0.36	48.6	42.7	51.0	44.1	44.7	32.7	54.5	53.7	49.7	43.7
DECEMBRE	0.00	35.4	36.9	50.5	34.2	48.0	42.7	49.0	39.9	46.1	38.5
	0.36	51.5	42.5	72.9	45.0	60.8	44.5	61.6	47.2	62.2	45.0

Tableau 3.12 - Récapitulation des fréquences d'erreurs négatives (sous-estimation) pour Montréal.

MODELES : ASHRAE & WCN
VILLE : MONTREAL

PROPORTION DES ERREURS HORAIRES NEGATIVES (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

	SEUIL	1973 ASH	1973 WCN	1974 ASH	1974 WCN	1975 ASH	1975 WCN	1976 ASH	1976 WCN	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WCN
JANVIER	0.00	31.3	38.7	48.8	52.8	40.3	49.6	47.9	49.1	42.2	47.7
	0.36	39.8	51.1	57.1	63.5	49.4	61.7	56.3	58.2	51.1	58.9
FEVRIER	0.00	30.2	38.9	33.9	36.3	0.0	0.0	35.8	41.8	34.0	39.0
	0.36	32.1	43.6	34.7	37.2	0.0	0.0	43.2	51.5	37.5	43.8
MARS	0.00	23.3	39.5	29.6	49.5	0.0	0.0	30.7	44.9	28.0	44.7
	0.36	25.5	47.5	33.8	58.3	0.0	0.0	35.3	52.6	31.9	53.0
AVRIL	0.00	23.5	39.1	31.2	49.2	0.0	0.0	37.7	43.3	30.8	43.9
	0.36	28.0	45.8	38.6	59.5	0.0	0.0	41.0	46.7	36.0	50.4
MAI	0.00	24.1	45.0	32.5	45.2	0.0	0.0	30.6	44.9	29.3	45.1
	0.36	25.0	48.8	39.4	51.7	0.0	0.0	35.7	53.1	33.9	51.3
JUIN	0.00	22.7	43.7	31.4	44.4	29.3	52.1	24.8	51.0	26.8	47.4
	0.36	26.4	49.0	35.1	47.1	31.5	54.1	27.7	53.1	30.1	50.6
JUILLET	0.00	46.1	49.3	55.3	59.7	46.8	53.2	54.4	53.2	50.7	53.9
	0.36	48.7	48.7	58.6	60.3	48.3	53.4	61.8	58.0	54.3	55.1
AOUT	0.00	37.0	44.5	56.1	54.9	55.5	57.5	52.8	51.2	50.3	52.0
	0.36	35.9	43.1	58.7	56.2	55.7	57.4	58.0	53.5	51.3	52.5
SEPTEMBRE	0.00	39.2	42.5	48.3	44.5	49.7	41.3	50.9	49.1	47.0	44.4
	0.36	43.6	45.6	56.2	50.0	59.4	47.1	59.5	56.0	54.6	49.7
OCTOBRE	0.00	43.9	40.0	59.7	46.1	66.5	52.6	60.6	44.8	57.7	45.9
	0.36	44.6	43.6	66.4	50.5	74.5	62.5	69.3	49.2	63.8	51.5
NOVEMBRE	0.00	55.2	39.1	56.6	46.3	52.5	45.0	56.7	38.7	55.2	42.5
	0.36	67.8	51.1	74.4	67.2	65.1	62.4	62.9	44.7	67.3	56.9
DECEMBRE	0.00	60.9	32.7	77.4	51.6	71.7	47.1	77.5	50.0	71.8	48.3
	0.36	72.3	41.5	86.5	70.2	82.9	54.3	82.1	53.7	81.3	55.1

Tableau 3.13 - Compilation des résultats pour trois mois d'hiver à Montréal.

VILLE	: MONTREAL	ANALYSE DES MODELES DE CALCUL DU RAYONNEMENT SOLAIRE	
PERIODE	: 1973 - 1976		
RAYONNEMENT	: GLOBAL		
MODELES	: ASHRAE & WON	IHM =	0.52 MJ/(H-M**2)
MOIS	: JANVIER		

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

	SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(H-M**2)
ERREUR RMS :	WON (34.0% , 32.7%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 4	WON (35.1% , 33.3%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 4
SOUS-ESTIMATION :	ASHRAE (42.2% , 47.7%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	ASHRAE (51.1% , 58.9%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
ERREUR RELATIVE ABSOLUE		
INFERIEUR A 10% :	(33.7% , 32.2%)	(34.1% , 31.1%)
A 20% :	(55.9% , 56.6%)	(56.1% , 56.1%)
A 30% :	(70.5% , 71.8%)	(71.9% , 72.9%)

MODELES	: ASHRAE & WON	IHM =	0.78 MJ/(H-M**2)
MOIS	: FEVRIER		

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

	SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(H-M**2)
ERREUR RMS :	WON (28.5% , 27.1%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 3	WON (28.6% , 24.5%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 3
SOUS-ESTIMATION :	ASHRAE (34.0% , 39.0%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 3	ASHRAE (37.5% , 43.8%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 3
ERREUR RELATIVE ABSOLUE		
INFERIEUR A 10% :	(33.4% , 41.9%)	(31.8% , 43.1%)
A 20% :	(59.6% , 66.0%)	(60.3% , 70.2%)
A 30% :	(73.9% , 77.3%)	(75.2% , 80.8%)

MODELES	: ASHRAE & WON	IHM =	0.40 MJ/(H-M**2)
MOIS	: DECEMBRE		

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

	SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)	SEUIL=0.36 MJ/(H-M**2)
ERREUR RMS :	WON (46.1% , 38.5%) CONFIRME 3 ANNEES SUR 4	WON (62.2% , 45.0%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
SOUS-ESTIMATION :	WON (71.8% , 45.3%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4	WON (81.3% , 55.1%) CONFIRME 4 ANNEES SUR 4
ERREUR RELATIVE ABSOLUE		
INFERIEUR A 10% :	(24.8% , 31.5%)	(10.0% , 27.5%)
A 20% :	(42.3% , 50.9%)	(19.7% , 45.6%)
A 30% :	(58.6% , 66.9%)	(33.0% , 61.2%)

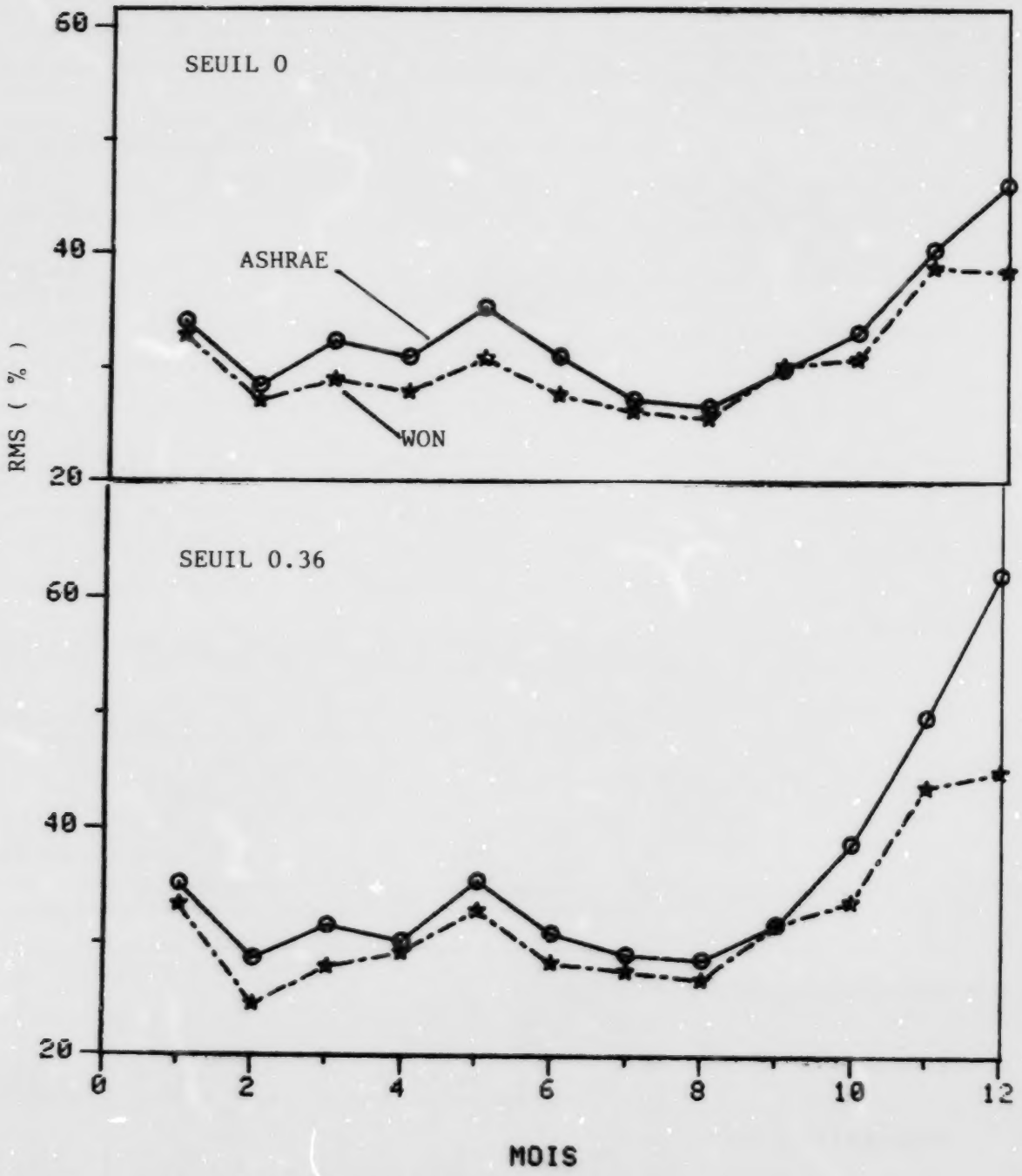


Figure 3.19 - Variation mensuelle de l'erreur RMS normalisée pour Montréal, 1973-1976.

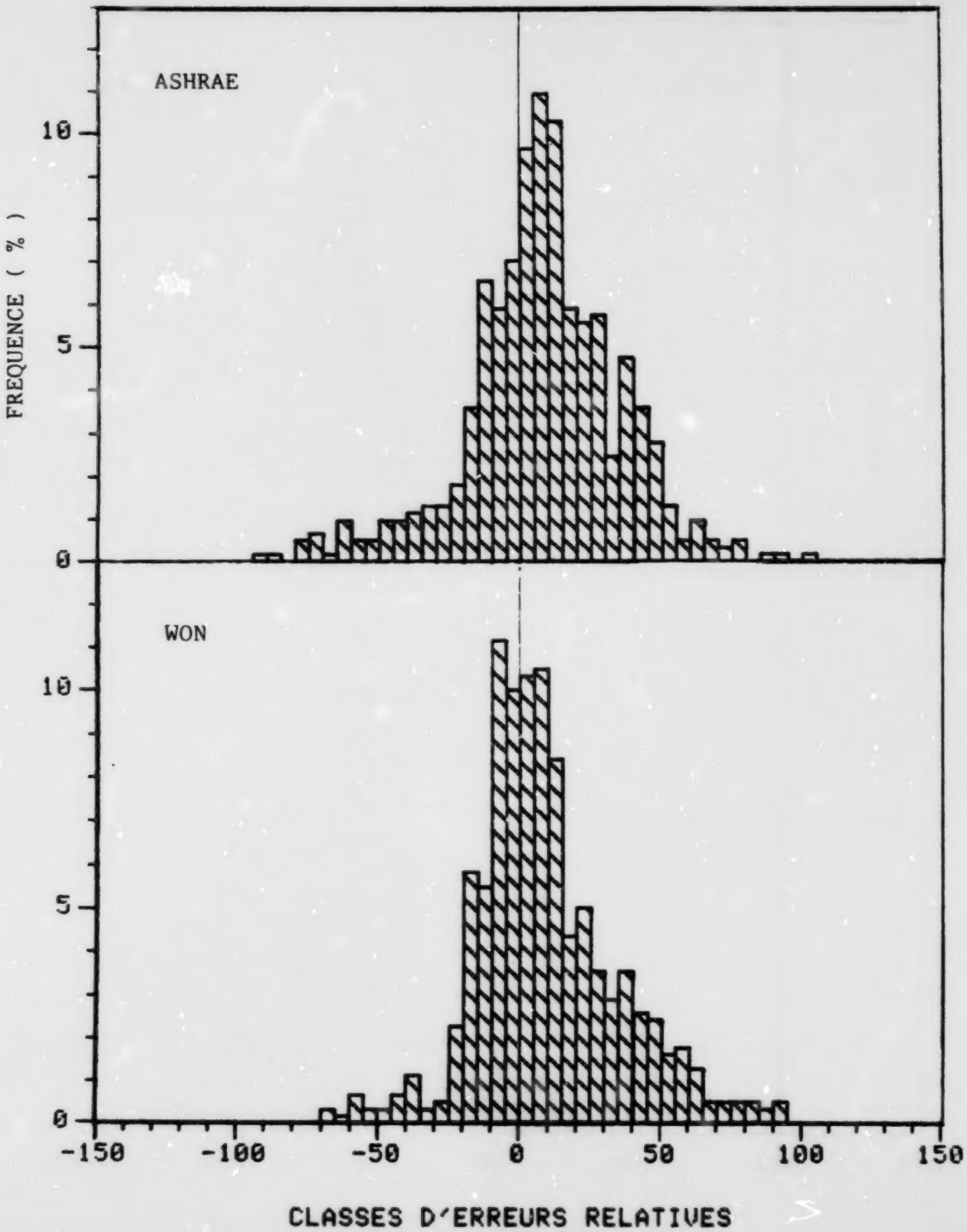


Figure 3.20 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Montréal (février, seuil 0).

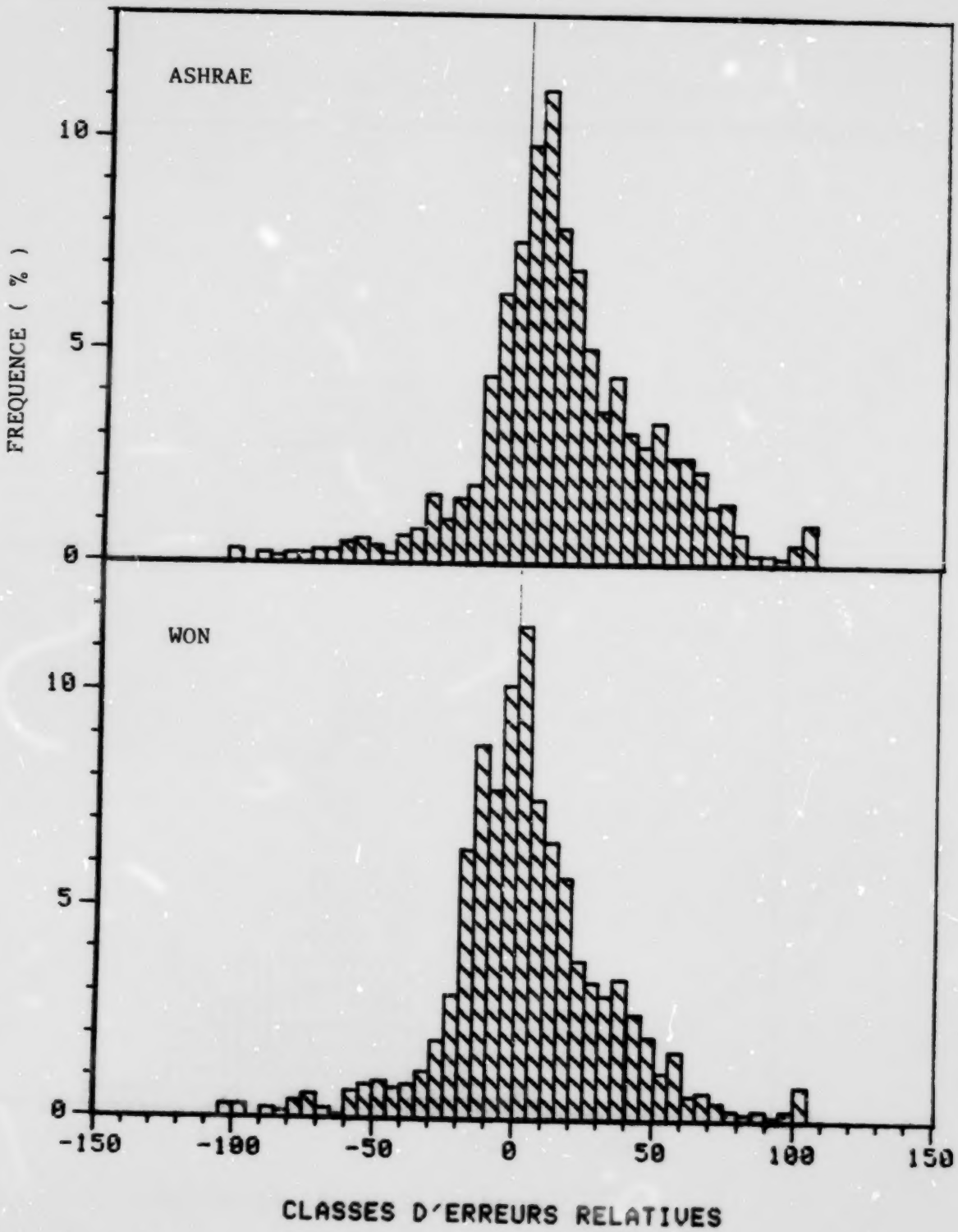


Figure 3.21 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Montréal (mai, seuil 0).

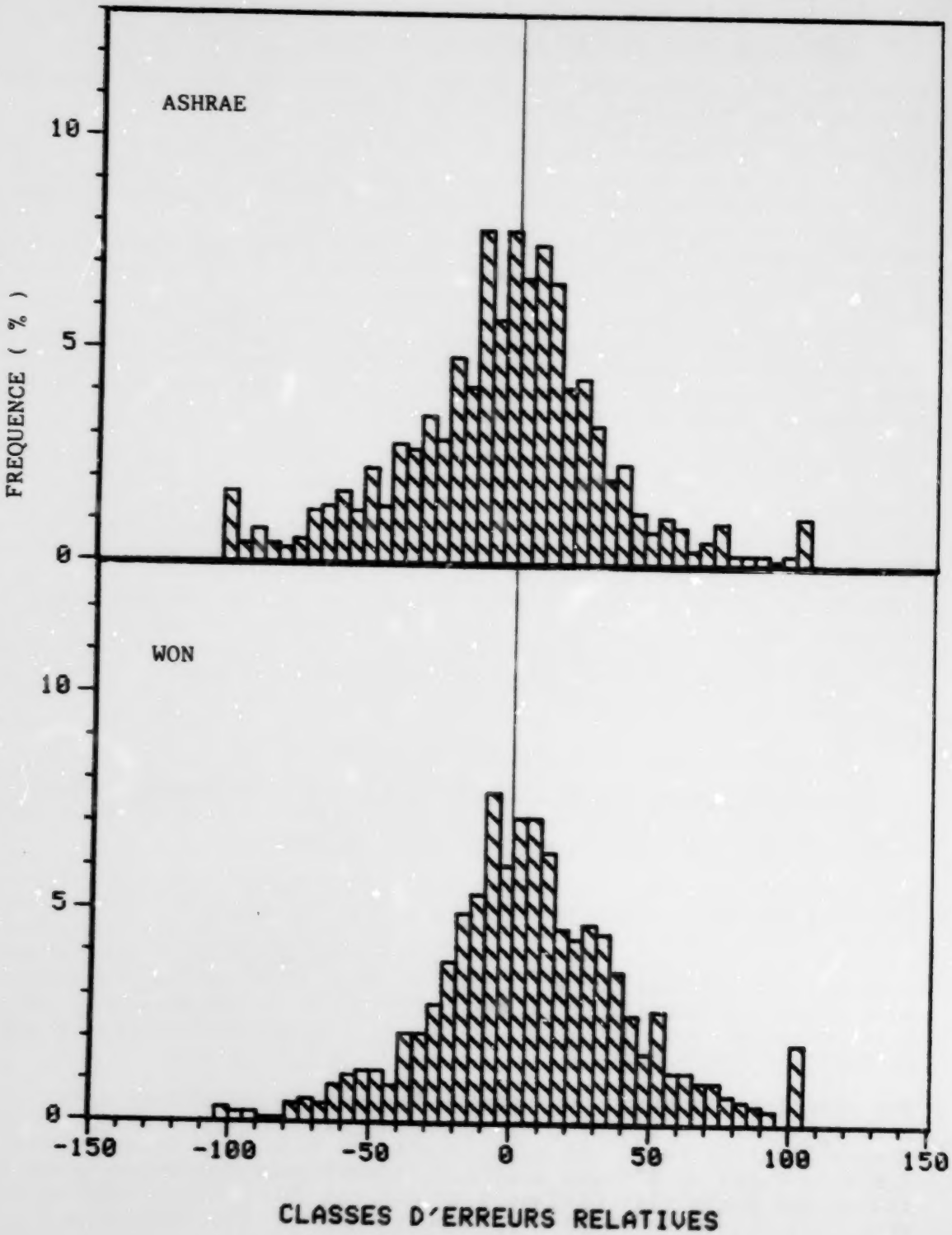


Figure 3.22 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour Montréal (novembre, seuil 0).

3.6 Résultats pour le rayonnement diffus

L'analyse sera restreinte ici au cas où aucun seuil n'est considéré, et sera faite simultanément pour Goose Bay et Montréal

On note tout d'abord (tableaux 3.14 et 3.15, figure 3.23) que l'erreur RMS est encore en faveur du modèle de Won de manière systématique, à quelques exceptions près (mai, juin, juillet et septembre à Goose Bay).

La comparaison avec les tableaux 3.8 et 3.11 permet également de constater que l'erreur RMS normalisée du rayonnement diffus est souvent 50 à 100% supérieure à celle du rayonnement global.

Du point de vue du biais d'estimation, l'avantage est encore au modèle de Won surtout à Montréal (tableaux 3.16 à 3.19). A Goose Bay, on remarquera une forte influence saisonnière pour les deux modèles qui sous-estiment en hiver et surestiment en été.

Les figures 3.24 à 3.27 indiquent une distribution d'erreurs très étalée, et la figure 3.28 montre que pour les deux modèles et les deux stations, la fréquence des erreurs relatives inférieures à 10, 20 ou 30% (en valeur absolue) est relativement constante dans l'année, mais également beaucoup plus faible que pour le rayonnement global.

Quant à la variation de l'erreur RMS_h selon les heures du jour, la figure 3.29 indique qu'elle est assez régulière pour les deux modèles de mois en mois à Montréal, avec toujours un avantage au modèle de Won. Cela se retrouve également à Goose Bay (figure 3.29).

3.7 Synthèse pour l'ensemble des stations

De l'ensemble des nombreux résultats qui viennent d'être présentés, il ressort que le modèle de Won se distingue par un comportement nettement plus précis et régulier que celui de l'ASHRAE.

Les tableaux 3.20 et 3.21 résument les résultats mensuels relatifs à l'erreur RMS et au biais d'estimation pour l'ensemble des stations et de la période 1973-1976. Au tableau 3.22 sont compilés ces résultats sur une base annuelle, ce qui synthétise au maximum la performance des modèles. Ce tableau permet également d'obtenir toutes les erreurs RMS sous forme non normalisée puisque l'irradiation moyenne I_{ha} ayant servi à la normalisation est indiquée pour le rayonnement global d'une part et diffus d'autre part.

Par exemple, à Montréal on observe une erreur RMS annuelle de 32.3% pour le modèle de l'ASHRAE (rayonnement global sans seuil), et 58.4% (rayonnement diffus). En multipliant ces valeurs respectivement par 0.974 et 0.444 MJ m^{-2} (qui sont les valeurs moyennes respectives des irradiations globale et diffuse), on obtient des erreurs RMS non normalisées de 0.315 et 0.259 MJ m^{-2} respectivement. Ces résultats font ressortir la moins grande difficulté à calculer le rayonnement global que le rayonnement diffus seul, du fait des compensations intervenant entre les composantes directe et diffuse.

Tableau 3.14 - Récapitulation des erreurs RMS horaires normalisées pour le rayonnement diffus à Goose Bay.

MODELES : ASHRAE & WON
VILLE : GOOSE BAY

ERREUR RMS HORAIRE (%)
RAYONNEMENT DIFFUS

	SEUIL	1973 ASH	1973 WON	1974 ASH	1974 WON	1975 ASH	1975 WON	1976 ASH	1976 WON	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WON
JANVIER	0.00	54.5	45.5	60.7	43.3	44.2	34.3	48.3	40.5	52.4	42.7
	0.36	85.5	70.7	97.9	80.2	65.7	49.6	75.2	62.0	83.9	68.4
FEVRIER	0.00	47.0	39.3	55.2	49.1	46.7	33.5	36.8	36.3	46.2	38.9
	0.36	60.2	49.2	68.1	55.8	59.9	43.7	48.9	49.2	60.1	49.6
MARS	0.00	41.7	39.0	46.5	38.8	46.5	41.7	43.2	39.2	44.5	39.7
	0.36	51.2	46.3	53.1	43.2	55.2	47.1	51.5	46.3	52.9	45.7
AVRIL	0.00	51.1	48.5	54.9	49.4	46.1	42.9	48.2	44.3	50.2	46.3
	0.36	56.6	53.9	63.4	56.5	51.9	46.9	55.2	50.0	57.0	52.0
MAI	0.00	45.7	48.3	58.3	58.3	43.9	42.7	48.4	48.4	49.4	49.9
	0.36	54.2	56.1	66.8	66.6	50.0	48.3	51.2	51.6	55.8	55.9
JUIN	0.00	58.7	67.0	62.7	69.5	64.8	64.2	58.1	68.6	61.1	67.4
	0.36	57.8	70.5	65.0	74.6	65.2	66.9	56.6	69.3	60.4	69.8
JUILLET	0.00	63.7	71.5	69.6	72.3	51.3	59.6	56.0	66.3	61.5	68.4
	0.36	68.8	77.7	70.2	74.8	52.1	62.7	59.2	68.5	64.1	72.0
AOUT	0.00	56.2	56.6	74.2	72.1	64.8	56.2	58.2	59.2	63.8	61.6
	0.36	64.3	65.4	88.1	82.2	74.4	60.5	60.4	62.1	73.3	68.8
SEPTEMBRE	0.00	67.1	61.9	58.2	63.4	48.2	54.6	50.8	57.2	56.4	59.4
	0.36	76.1	60.5	65.2	70.7	51.8	52.7	54.4	51.3	63.4	60.4
OCTOBRE	0.00	68.4	58.1	51.1	39.2	56.8	45.9	59.0	43.8	59.2	47.4
	0.36	89.7	71.4	66.0	44.7	79.3	53.5	76.6	44.1	78.5	54.9
NOVEMBRE	0.00	74.7	58.4	59.3	49.8	61.5	49.8	66.5	48.4	65.8	51.8
	0.36	131.7	95.5	82.8	61.5	103.2	67.9	109.5	72.4	108.4	75.8
DECEMBRE	0.00	73.1	51.1	71.5	57.5	59.7	45.7	65.1	47.3	67.3	50.2
	0.36	133.3	93.0	104.8	71.0	116.7	77.4	128.0	88.7	124.1	85.4

Tableau 3.15 - Récapitulation des erreurs RMS horaires normalisées pour le rayonnement diffus à Montréal.

MODELES : ASHRAE & WON
VILLE : MONTREAL

ERREUR RMS HORAIRE (%)
RAYONNEMENT DIFFUS

	SEUIL	1973 ASH	1973 WON	1974 ASH	1974 WON	1975 ASH	1975 WON	1976 ASH	1976 WON	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WON
JANVIER	0.00	48.2	46.3	55.5	48.2	49.2	44.7	52.7	45.4	51.5	46.2
	0.36	54.0	44.7	62.0	49.8	50.5	44.7	61.7	50.2	57.8	47.7
FEVRIER	0.00	53.8	45.5	50.5	44.2	52.3	50.5	53.0	51.8	52.4	48.1
	0.36	59.3	40.7	55.8	46.2	47.0	41.4	56.8	45.7	54.1	44.2
MARS	0.00	62.6	59.6	54.1	49.4	53.9	50.8	64.3	57.0	59.1	54.5
	0.36	46.8	49.6	57.2	51.1	56.0	52.7	59.8	50.8	55.6	51.1
AVRIL	0.00	59.4	50.9	60.4	51.3	53.2	47.0	55.1	49.7	57.2	49.9
	0.36	60.4	55.7	53.0	53.8	51.8	49.7	55.3	53.6	55.2	53.3
MAI	0.00	53.1	47.1	63.0	56.3	51.9	45.4	61.9	54.4	57.9	51.2
	0.36	57.5	56.3	59.4	59.6	53.1	48.9	51.1	51.9	55.0	54.0
JUIN	0.00	54.1	53.9	53.8	52.0	54.3	49.4	49.7	54.6	53.0	52.5
	0.36	47.8	53.8	53.2	55.1	54.3	51.7	50.6	59.5	51.5	55.5
JUILLET	0.00	55.2	40.7	61.0	51.9	57.1	56.3	57.1	53.3	57.7	51.0
	0.36	63.7	46.0	66.0	55.7	62.1	62.3	60.1	56.1	63.0	55.7
AOUT	0.00	52.4	49.3	62.3	53.5	53.3	43.5	55.0	51.5	55.9	49.6
	0.36	58.2	54.5	69.0	60.6	59.7	49.1	60.2	56.9	61.5	55.2
SEPTEMBRE	0.00	57.2	61.0	59.5	51.9	55.8	50.7	60.3	59.3	58.0	55.5
	0.36	61.2	68.7	65.9	58.4	57.7	49.8	63.3	61.0	62.0	59.7
OCTOBRE	0.00	54.6	52.4	60.1	52.4	58.8	50.0	58.5	48.8	58.1	50.9
	0.36	67.4	59.5	71.0	58.8	73.5	55.2	73.2	55.2	71.4	57.1
NOVEMBRE	0.00	58.7	53.5	61.7	60.2	54.6	50.2	55.4	47.2	57.7	53.0
	0.36	78.4	61.7	85.5	73.6	70.3	53.5	71.7	53.5	76.3	60.6
DECEMBRE	0.00	48.8	47.2	64.5	45.2	57.3	46.8	66.5	48.8	59.7	47.0
	0.36	85.1	48.4	105.2	58.9	93.1	56.0	106.5	66.5	98.9	58.6

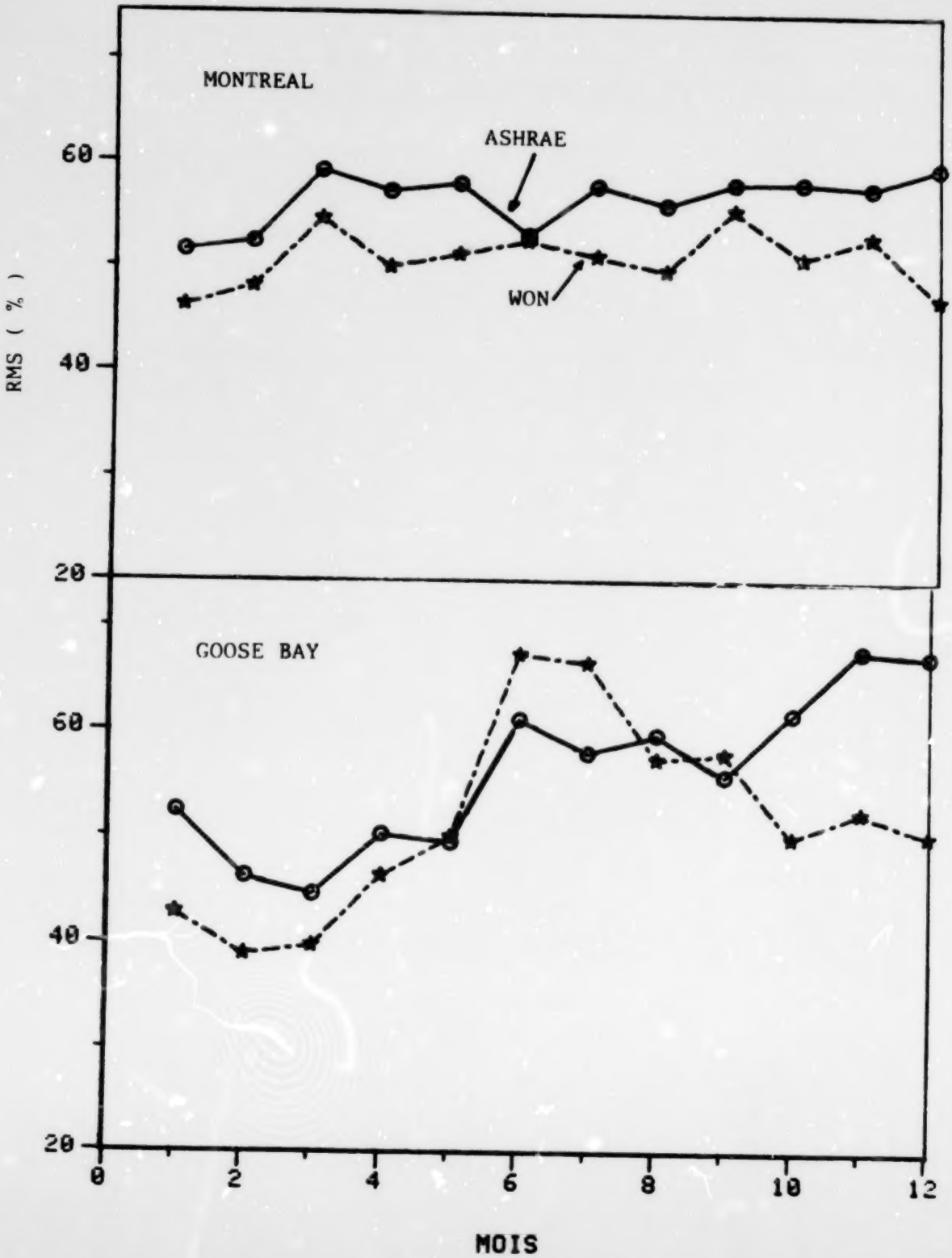


Figure 3.23 - Variation mensuelle de l'erreur RMS normalisée pour le rayonnement diffus à Montréal et Goose Bay.

Tableau 3.16 - Récapitulation des fréquences d'erreurs négatives (sous-estimation pour le rayonnement diffus à Goose Bay.

MODELES : ASHRAE & WGN
VILLE : GOOSE BAY

PROPORTION DES ERREURS HORAIRES NEGATIVES (%)
RAYONNEMENT DIFFUS

	SEUIL	1973 ASH	1973 WGN	1974 ASH	1974 WGN	1975 ASH	1975 WGN	1976 ASH	1976 WGN	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WGN
JANVIER	0.00	89.0	74.8	91.0	81.0	85.0	72.8	85.4	79.8	87.6	77.1
	0.36	98.3	94.8	98.2	92.9	94.3	77.1	100.0	97.8	97.9	91.8
FEVRIER	0.00	79.2	60.6	81.8	75.0	91.3	72.3	79.1	55.9	82.8	65.1
	0.36	85.3	67.0	88.2	76.5	89.9	76.4	73.6	62.5	84.8	70.7
MARS	0.00	77.5	65.3	70.6	56.9	70.9	62.5	74.1	60.8	73.3	61.3
	0.36	78.2	63.1	71.1	52.7	76.0	63.2	75.0	57.1	75.0	59.0
AVRIL	0.00	64.4	65.2	64.4	63.2	56.0	57.7	69.9	64.8	63.7	62.8
	0.36	67.5	62.6	65.6	58.6	64.2	58.0	74.7	63.6	68.2	60.7
MAI	0.00	40.2	46.4	49.9	55.7	50.6	56.1	46.1	54.8	46.6	53.2
	0.36	50.8	45.8	65.6	63.3	54.4	51.9	55.0	54.6	56.5	54.0
JUIN	0.00	36.0	41.1	26.9	35.2	35.2	40.4	32.5	35.4	32.6	38.0
	0.36	37.1	34.4	26.8	24.4	42.3	40.1	34.9	27.3	36.3	32.2
JUILLET	0.00	35.4	32.6	38.3	35.3	43.8	39.0	38.5	33.8	38.8	35.1
	0.36	38.6	24.4	50.0	31.1	46.1	31.8	41.6	26.1	44.0	28.3
AOUT	0.00	42.2	41.2	43.4	41.0	46.7	40.7	34.5	28.6	41.5	37.8
	0.36	47.0	37.9	58.0	43.7	64.0	46.8	49.3	26.1	54.6	38.9
SEPTEMBRE	0.00	54.4	49.7	32.4	29.8	34.1	32.0	40.5	34.5	40.0	36.2
	0.36	76.4	64.0	39.1	26.0	58.0	37.4	62.8	45.5	58.0	42.6
OCTOBRE	0.00	70.1	56.3	62.1	50.4	59.0	49.0	71.2	61.7	65.4	54.0
	0.36	87.8	70.7	82.6	64.3	83.2	64.5	93.2	75.2	86.8	68.8
NOVEMBRE	0.00	72.1	65.0	63.3	62.0	70.3	61.4	74.7	68.4	70.1	64.2
	0.36	96.6	96.6	88.1	76.3	95.9	85.8	98.1	94.4	94.6	89.1
DECEMBRE	0.00	77.7	73.7	88.9	85.4	89.5	79.6	77.9	66.9	83.3	75.9
	0.36	100.0	100.0	100.0	93.3	100.0	100.0	100.0	96.0	100.0	97.7

Tableau 3.17 - Récapitulation des fréquences d'erreurs négatives (sous-estimation) pour le rayonnement diffus à Montréal.

MODELES : ASHRAE & WON
VILLE : MONTREAL

PROPORTION DES ERREURS HORAIRES NEGATIVES (%)
RAYONNEMENT DIFFUS

	SEUIL	1973 ASH	1973 WON	1974 ASH	1974 WON	1975 ASH	1975 WON	1976 ASH	1976 WON	1973 - 1976 ASH	1973 - 1976 WON
JANVIER	0.00	55.4	42.6	68.1	63.3	59.6	51.8	73.8	62.5	64.3	55.1
	0.36	82.4	71.6	88.1	80.2	77.4	67.9	92.9	81.8	85.8	76.0
FEVRIER	0.00	68.7	54.0	66.9	57.3	65.8	56.8	56.7	50.4	64.3	54.5
	0.36	79.4	55.9	70.6	62.2	72.8	62.3	74.4	64.0	73.2	62.2
MARS	0.00	43.2	38.0	55.2	42.7	51.3	45.4	56.1	54.6	51.5	45.2
	0.36	52.5	46.8	59.0	44.0	54.1	43.2	63.0	57.8	57.7	48.5
AVRIL	0.00	28.7	42.1	39.7	51.4	51.9	67.0	44.3	62.1	40.7	55.2
	0.36	30.9	43.8	51.1	58.5	59.9	72.0	46.4	63.0	47.1	59.6
MAI	0.00	30.8	51.6	29.7	45.9	37.1	58.9	37.1	55.5	33.7	52.9
	0.36	35.2	49.7	36.7	47.6	35.6	54.4	43.7	63.9	38.1	54.6
JUIN	0.00	31.2	53.4	33.7	55.4	26.2	52.1	47.1	69.3	34.6	57.6
	0.36	43.7	62.0	38.3	56.7	27.7	49.0	52.5	70.8	41.6	60.5
JUILLET	0.00	21.9	55.0	34.8	58.1	38.5	65.4	37.8	58.1	33.4	59.2
	0.36	22.2	48.1	39.8	56.5	39.3	63.2	46.6	63.6	37.3	58.1
AOUT	0.00	46.0	67.4	35.3	54.9	33.2	56.4	42.5	60.5	39.2	59.8
	0.36	49.3	67.9	43.3	54.3	36.5	51.5	49.6	62.5	45.3	59.5
SEPTEMBRE	0.00	34.6	51.2	36.2	51.5	37.2	50.3	29.9	43.2	35.0	49.7
	0.36	43.4	58.2	43.5	53.6	49.2	57.7	45.7	51.1	45.3	55.7
OCTOBRE	0.00	38.8	52.0	46.8	53.2	51.0	55.5	54.2	58.7	47.7	54.9
	0.36	57.8	60.3	69.4	66.4	67.2	68.8	72.7	69.7	67.1	66.5
NOVEMBRE	0.00	51.5	42.2	50.8	47.1	41.3	48.3	62.1	57.5	51.4	49.0
	0.36	71.0	65.2	79.5	82.1	68.4	77.6	74.5	69.8	73.6	73.6
DECEMBRE	0.00	56.5	41.1	75.4	57.3	66.8	62.1	77.0	68.1	69.0	57.1
	0.36	81.5	74.1	93.2	87.8	84.3	82.9	92.2	85.7	88.4	83.3

Tableau 3.18 - Compilation des résultats pour trois mois d'hiver à Goose Bay (rayonnement diffus).

```
VILLE          : GOOSE BAY                    ANALYSE DES MODELES DE CALCUL
PERIODE        : 1973 - 1976                  DU RAYONNEMENT SOLAIRE
RAYONNEMENT    : DIFFUS
MODELES        : ASHRAE & WON                 IHM =  0.24 MJ/(H-M**2)
MOIS           : JANVIER

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

                   SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

  ERREUR RMS       : WON
                     (  52.4% ,  42.7% )
                     CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  SOUS-ESTIMATION  : WON
                     (  87.6% ,  77.1% )
                     CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  ERREUR RELATIVE ABSOLUE

    INFERIEUR A 10% : (  10.9% ,  16.7% )
              A 20% : (  25.5% ,  36.2% )
              A 30% : (  42.7% ,  56.2% )

MODELES        : ASHRAE & WON                 IHM =  0.36 MJ/(H-M**2)
MOIS           : FEVRIER

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

                   SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

  ERREUR RMS       : WON
                     (  46.2% ,  38.9% )
                     CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  SOUS-ESTIMATION  : WON
                     (  82.8% ,  65.1% )
                     CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  ERREUR RELATIVE ABSOLUE

    INFERIEUR A 10% : (  16.8% ,  19.0% )
              A 20% : (  37.4% ,  41.5% )
              A 30% : (  53.2% ,  63.2% )

MODELES        : ASHRAE & WON                 IHM =  0.19 MJ/(H-M**2)
MOIS           : DECEMBRE

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

                   SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

  ERREUR RMS       : WON
                     (  67.3% ,  50.2% )
                     CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  SOUS-ESTIMATION  : WON
                     (  83.3% ,  75.9% )
                     CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  ERREUR RELATIVE ABSOLUE

    INFERIEUR A 10% : (  14.7% ,  14.5% )
              A 20% : (  27.8% ,  30.8% )
              A 30% : (  41.9% ,  46.8% )
```

Tableau 3.19 - Compilation des résultats pour trois mois d'hiver à Montréal (rayonnement diffus).

```
VILLE        : MONTREAL                          ANALYSE DES MODELES DE CALCUL
PERIODE      : 1973 - 1976                       DU RAYONNEMENT SOLAIRE
RAYONNEMENT  : DIFFUS
MODELES      : ASHRAE & WON                      IHM =  0.31 MJ/(H-M**2)
MOIS         : JANVIER

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

                        SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

  ERREUR RMS          : WON
                        (  51.5% ,  46.2% )
                        CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  SOUS-ESTIMATION     : WON
                        (  64.3% ,  55.1% )
                        CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  ERREUR RELATIVE ABSOLUE

    INFERIEUR A 10% : (  13.5% ,  15.3% )
              A 20% : (  29.7% ,  31.1% )
              A 30% : (  46.9% ,  48.7% )

MODELES      : ASHRAE & WON                      IHM =  0.40 MJ/(H-M**2)
MOIS         : FEVRIER

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

                        SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

  ERREUR RMS          : WON
                        (  52.4% ,  48.1% )
                        CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  SOUS-ESTIMATION     : WON
                        (  64.3% ,  54.5% )
                        CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  ERREUR RELATIVE ABSOLUE

    INFERIEUR A 10% : (  15.4% ,  17.8% )
              A 20% : (  33.7% ,  39.8% )
              A 30% : (  46.8% ,  57.4% )

MODELES      : ASHRAE & WON                      IHM =  0.25 MJ/(H-M**2)
MOIS         : DECEMBRE

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

                        SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

  ERREUR RMS          : WON
                        (  59.7% ,  47.0% )
                        CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  SOUS-ESTIMATION     : WON
                        (  69.0% ,  57.1% )
                        CONFIRME 4 ANNEES SUR 4

  ERREUR RELATIVE ABSOLUE

    INFERIEUR A 10% : (  18.9% ,  17.0% )
              A 20% : (  38.2% ,  36.1% )
              A 30% : (  52.6% ,  50.9% )
```

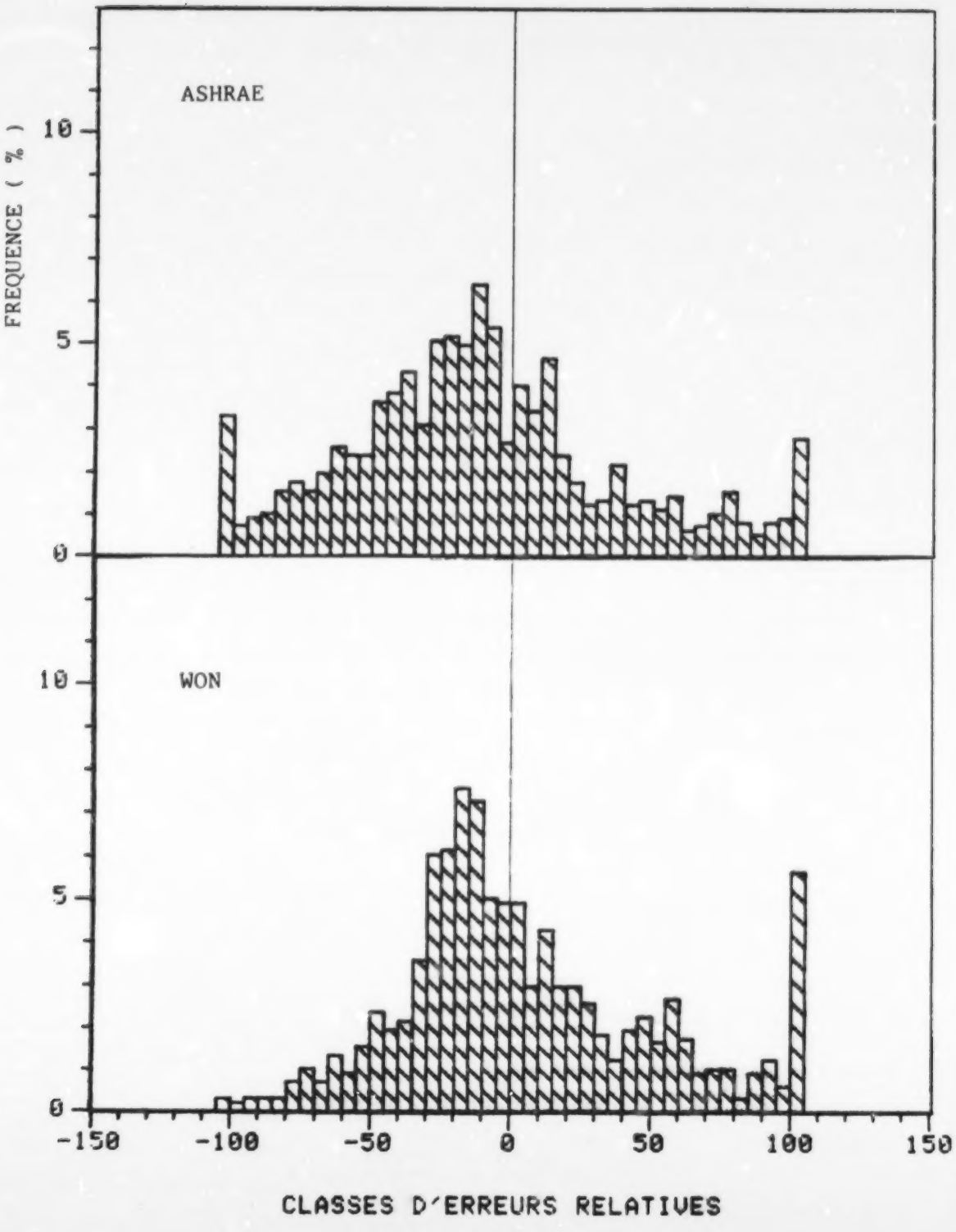


Figure 3.24 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour le rayonnement diffus à Montréal (février).

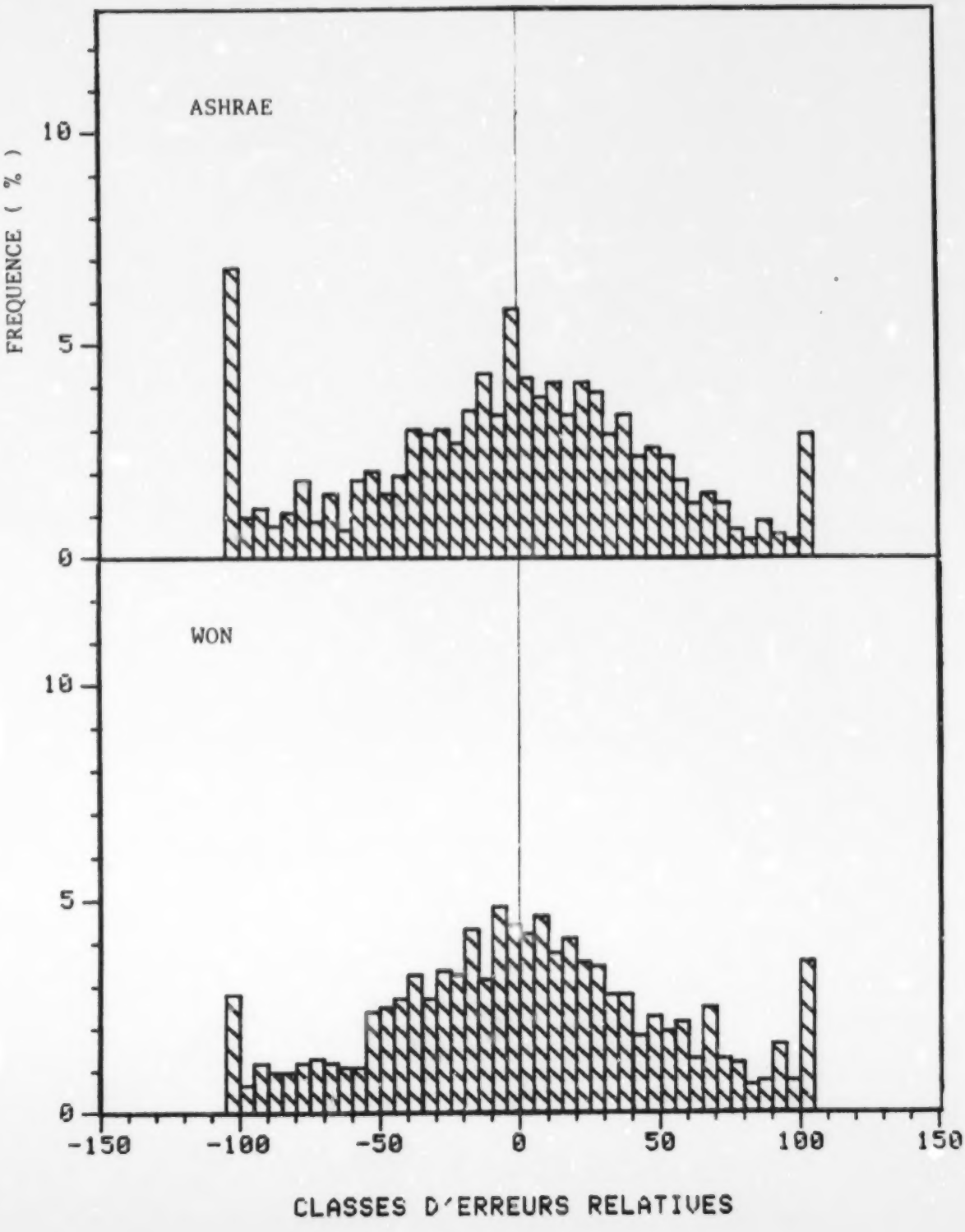


Figure 3.25 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour le rayonnement diffus à Montréal (novembre).

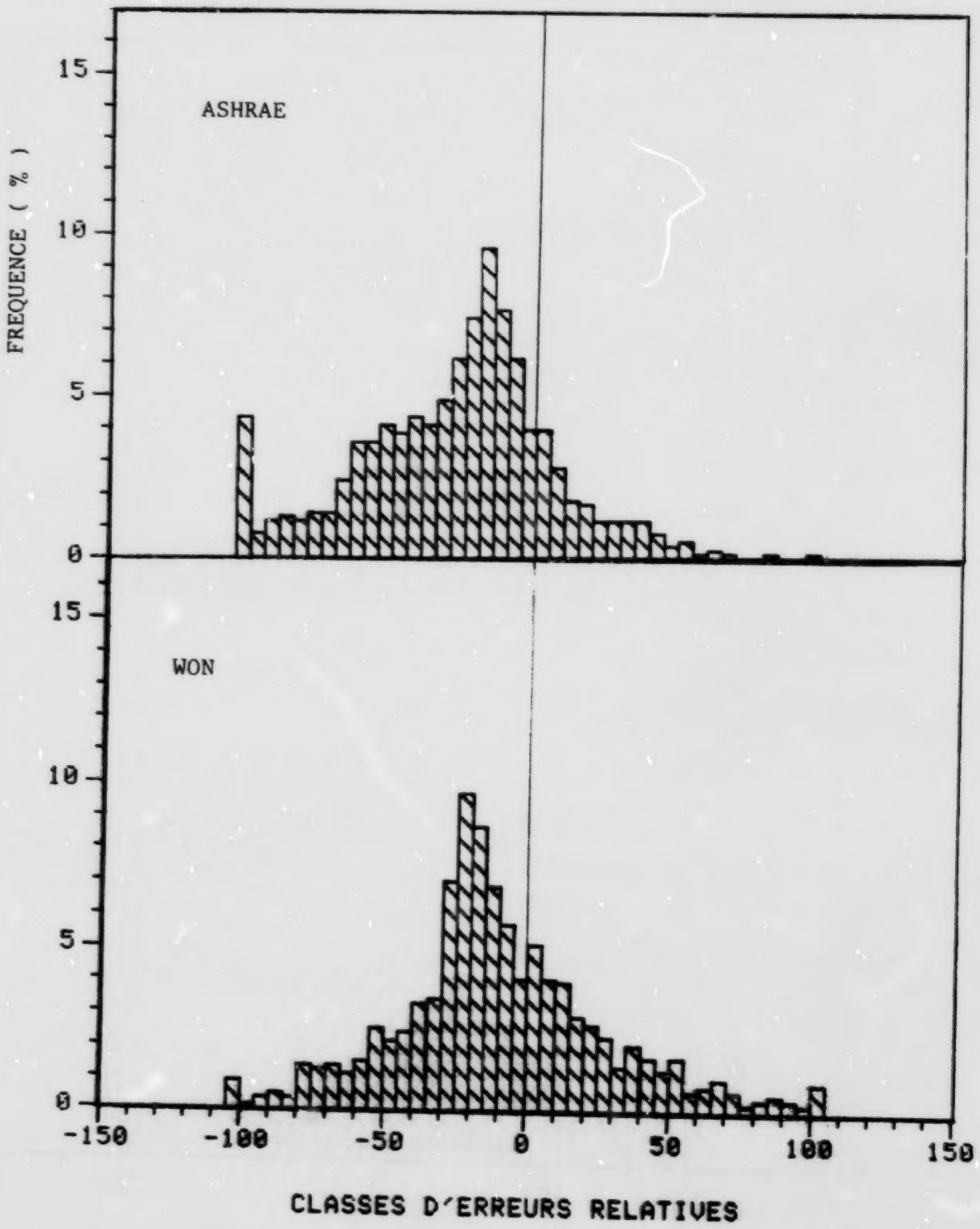


Figure 3.26 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour le rayonnement diffus à Goose Bay (février).

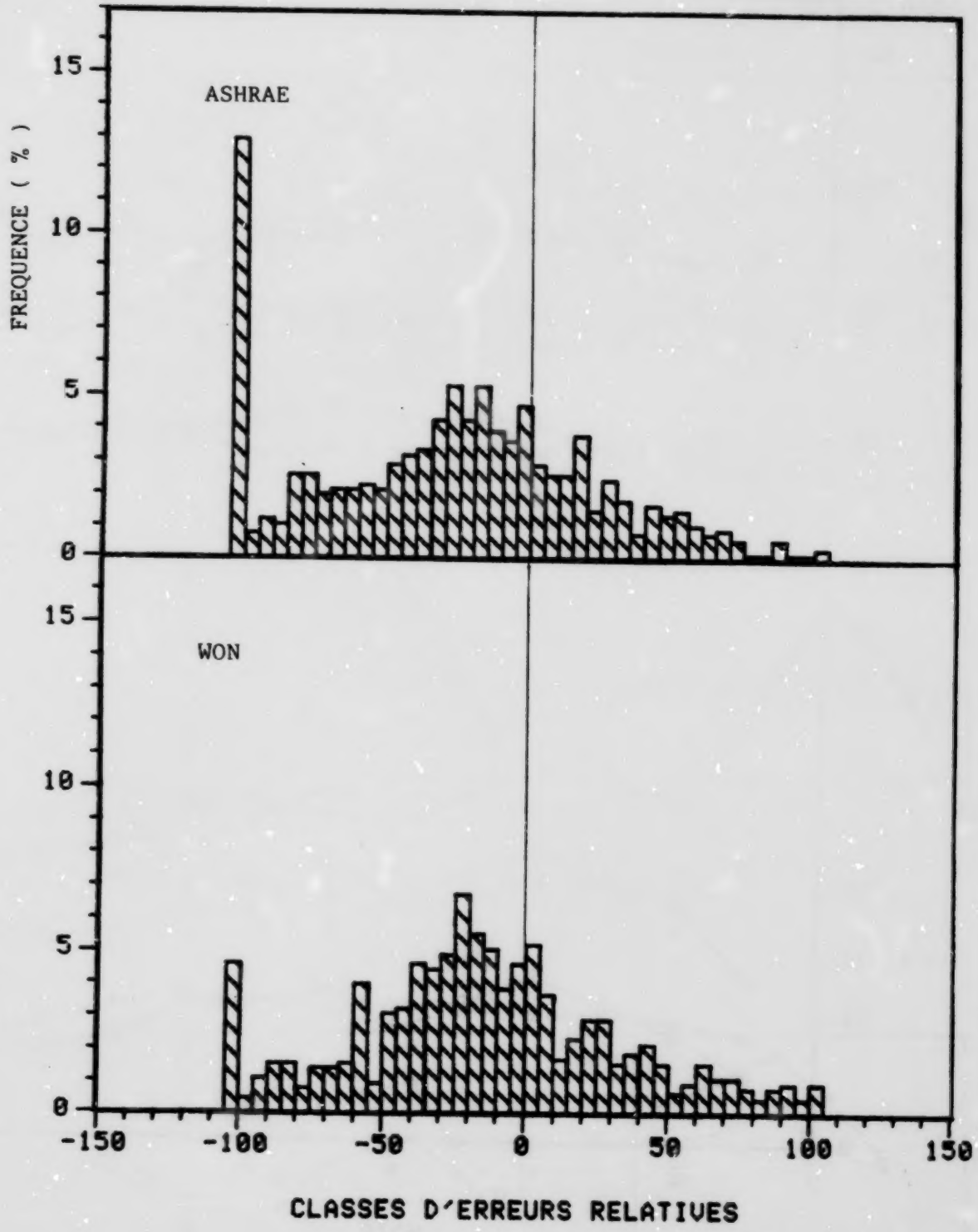


Figure 3.27 - Histogrammes des tréquences d'erreurs relatives pour le rayonnement diffus à Goose Bay (novembre).

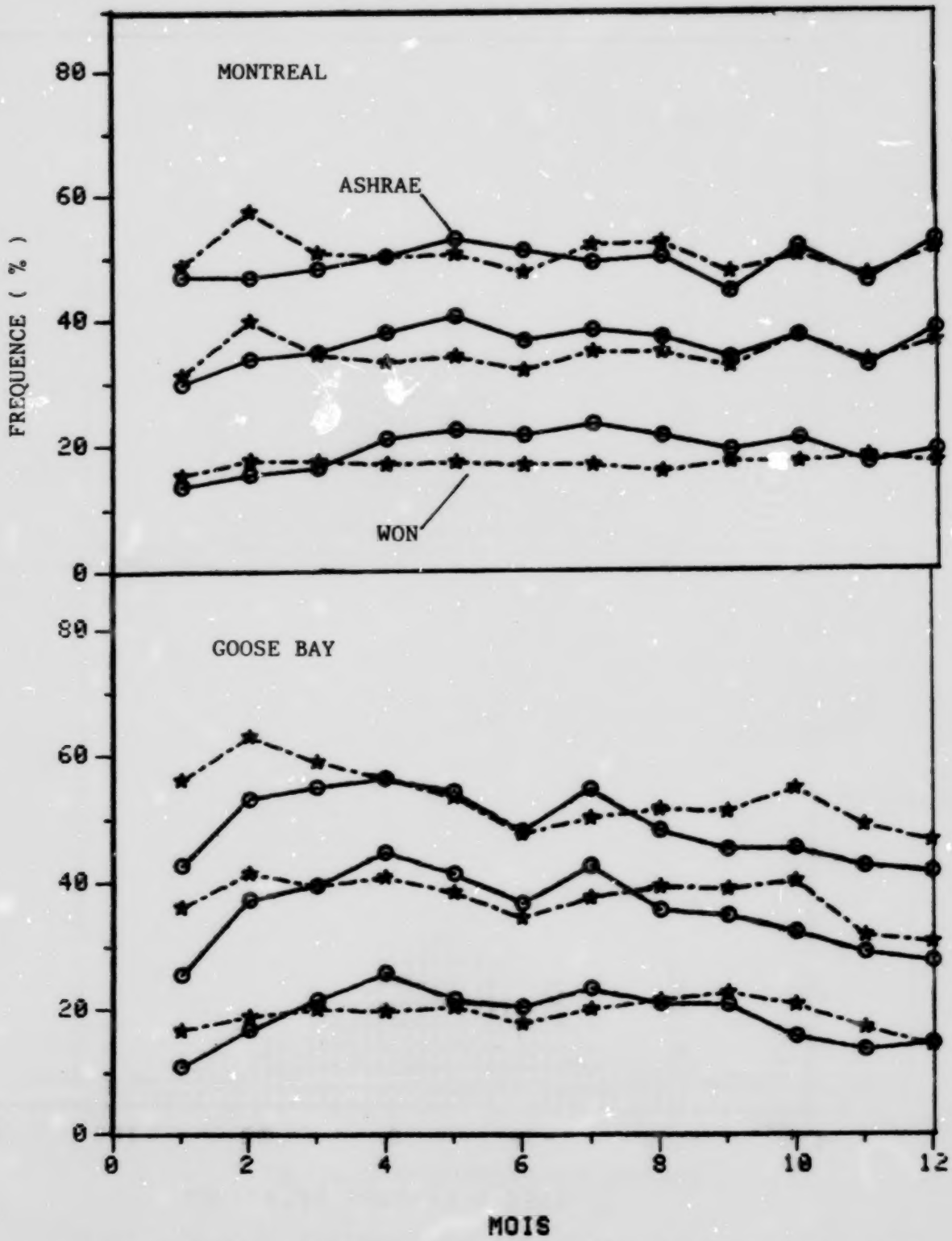
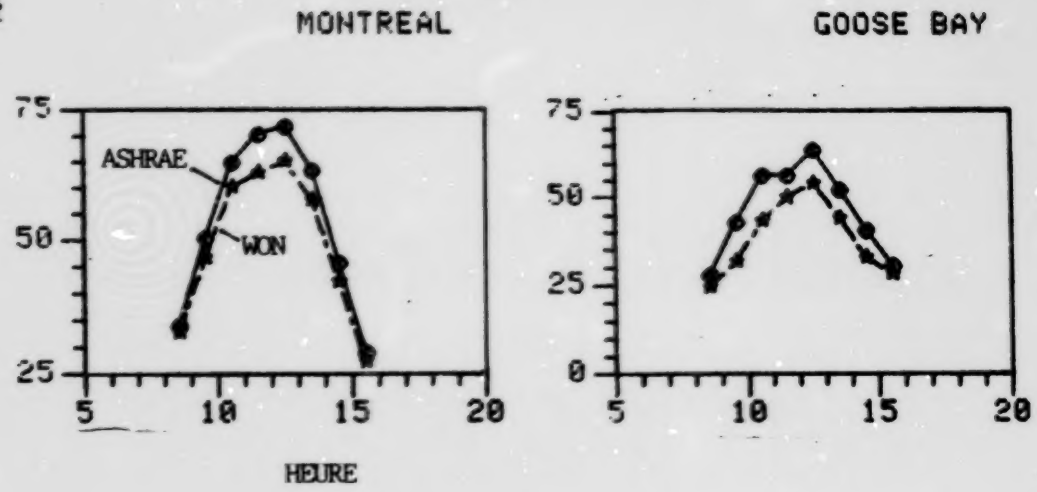
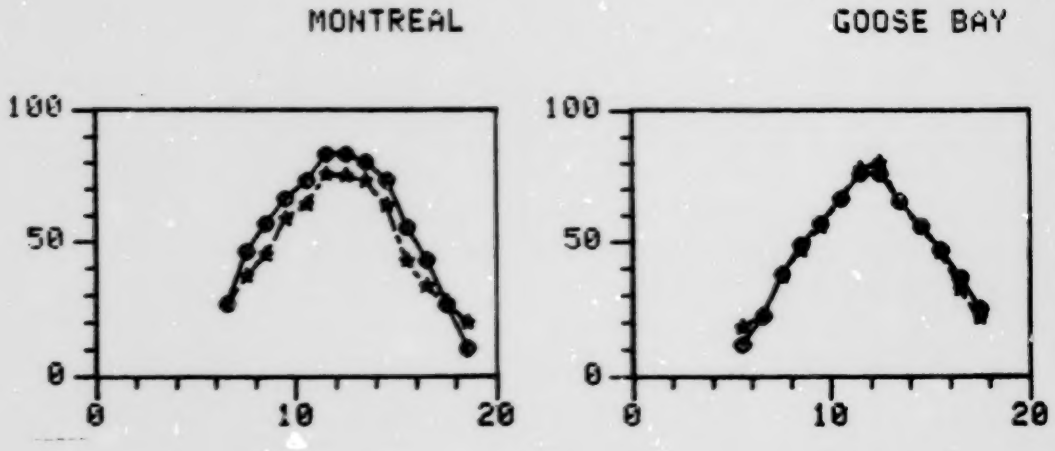


Figure 3.28 - Fréquence des erreurs relatives inférieures à 10, 20 et 30% en valeur absolue pour le rayonnement diffus.

FEVRIER



MAI



DECEMBRE

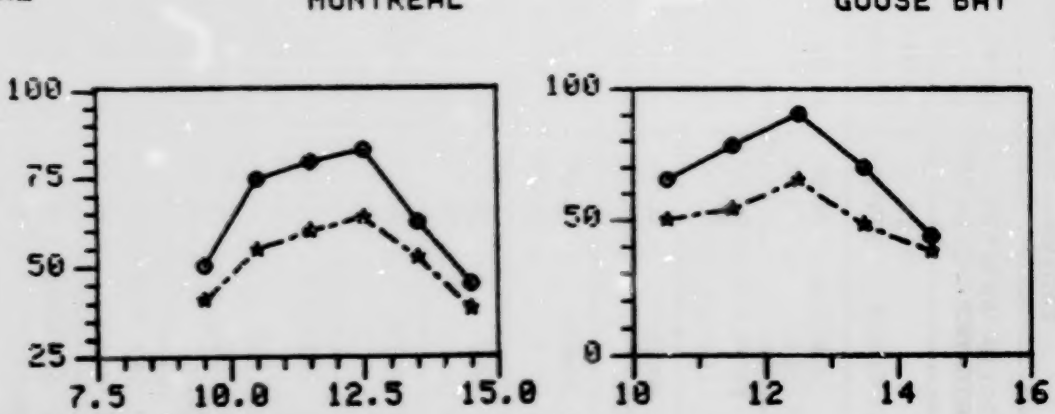


Figure 3.29 - Variation horaire de l'erreur RMS_h pour le rayonnement diffus.

Tableau 3.20 - Récapitulation des erreurs RMS mensuelles normalisées, 1973-1976

ERREUR RMS (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

	SEUIL	SEPT-ILES ASH	SEPT-ILES WON	OTTAWA ASH	OTTAWA WON	GOOSE BAY ASH	GOOSE BAY WON	MONTREAL ASH	MONTREAL WON
JANVIER	0.00	26.1	22.5	30.1	27.1	30.8	27.9	34.0	32.7
	0.36	29.5	24.0	31.4	28.0	34.6	31.1	35.1	33.3
FEVRIER	0.00	25.4	22.8	27.7	25.3	27.8	23.5	28.5	27.1
	0.36	26.7	22.8	28.2	23.4	30.3	24.9	28.6	24.5
MARS	0.00	26.9	24.5	26.4	24.6	24.5	20.8	32.3	29.0
	0.36	27.3	23.2	26.0	24.1	26.3	22.1	31.5	27.8
AVRIL	0.00	29.5	27.4	27.0	26.7	34.6	27.7	31.0	27.9
	0.36	30.7	27.3	26.7	27.7	37.7	30.0	30.1	29.1
MAI	0.00	29.7	28.6	35.4	32.6	32.0	30.4	35.2	30.9
	0.36	29.9	28.5	36.6	35.6	34.3	32.6	35.4	32.8
JUIN	0.00	28.8	27.1	31.9	29.8	32.5	32.1	31.1	27.7
	0.36	27.6	27.3	31.8	30.8	34.4	34.2	30.8	28.2
JUILLET	0.00	31.8	29.7	26.1	25.9	31.5	35.1	27.3	26.3
	0.36	35.0	30.0	27.4	26.7	35.4	37.3	29.0	27.5
AOUT	0.00	27.9	28.1	26.0	23.8	36.6	31.6	26.7	25.6
	0.36	30.4	28.0	27.2	24.2	40.8	33.0	28.6	26.8
SEPTEMBRE	0.00	32.0	31.0	34.4	33.6	41.7	40.3	29.9	30.2
	0.36	35.3	30.9	37.4	35.9	48.4	43.4	31.7	31.6
OCTOBRE	0.00	39.3	31.5	30.3	27.6	45.4	36.1	33.2	30.9
	0.36	42.6	33.4	34.8	29.6	56.1	41.3	38.8	33.7
NOVEMBRE	0.00	38.8	33.7	39.8	37.7	47.1	36.0	40.3	38.8
	0.36	49.9	40.1	49.5	44.0	64.3	46.2	49.7	43.7
DECEMBRE	0.00	35.4	27.7	46.2	33.9	51.3	35.1	46.1	38.5
	0.36	43.5	28.1	59.8	38.8	63.8	43.9	62.2	45.0

Tableau 3.21 - Récapitulation des fréquences d'erreurs négatives, 1973-1976

FREQUENCES DE SOUS-ESTIMATION (%)
RAYONNEMENT GLOBAL

	SEUIL	SEPT-ILES ASH	SEPT-ILES WON	OTTAWA ASH	OTTAWA WON	GOOSE BAY ASH	GOOSE BAY WON	MONTREAL ASH	MONTREAL WON
JANVIER	0.00	66.1	67.1	44.7	49.9	86.2	82.9	42.2	47.7
	0.36	67.3	70.0	50.3	57.9	89.7	86.9	51.1	58.9
FEVRIER	0.00	54.8	57.6	47.6	54.2	77.5	76.6	34.0	39.0
	0.36	54.2	58.2	49.6	58.5	78.7	77.2	37.5	43.8
MARS	0.00	48.0	57.9	36.9	52.4	68.3	71.4	28.0	44.7
	0.36	50.7	62.2	40.6	59.1	69.2	72.0	31.9	53.0
AVRIL	0.00	56.4	49.6	42.4	54.0	78.2	68.8	30.8	43.9
	0.36	67.2	55.8	47.3	58.9	83.3	69.6	36.0	50.4
MAI	0.00	52.3	47.0	37.2	52.6	60.6	57.5	29.3	45.1
	0.36	62.2	52.4	41.5	57.0	66.1	59.3	33.9	51.3
JUIN	0.00	46.1	47.5	31.9	49.4	51.1	47.8	26.8	47.4
	0.36	48.5	47.5	37.1	54.1	56.1	48.0	30.1	50.6
JUILLET	0.00	63.0	42.1	51.0	51.4	58.8	41.5	50.7	53.9
	0.36	71.4	43.9	55.2	52.1	64.2	40.3	54.3	55.1
AOUT	0.00	62.8	41.2	55.1	51.6	66.1	47.5	50.3	52.0
	0.36	71.7	44.4	58.0	53.1	75.7	51.2	51.3	52.5
SEPTEMBRE	0.00	59.1	41.5	53.6	47.3	49.0	43.3	47.0	44.4
	0.36	74.5	48.9	62.5	53.2	73.5	52.5	54.6	49.7
OCTOBRE	0.00	70.1	48.3	57.7	45.3	75.1	53.9	57.7	45.9
	0.36	84.6	58.6	65.1	50.0	84.2	61.9	63.8	51.5
NOVEMBRE	0.00	72.9	57.4	62.0	48.4	80.8	64.9	55.2	42.5
	0.36	83.6	68.0	74.2	63.7	87.7	73.0	67.3	56.9
DECEMBRE	0.00	76.2	52.5	82.3	55.9	91.0	75.3	71.8	45.3
	0.36	90.4	67.6	89.5	66.2	92.6	83.3	81.3	55.1

Tableau 3.22 - Récapitulation des erreurs RMS annuelles aux différentes stations pour le rayonnement global et le rayonnement diffus.
Ensemble des valeurs horaires de la période 1973-1976,
I_{ha} : irradiation moyenne annuelle.

		Station	SEPT-ILES		OTTAWA		GOOSE BAY		MONTREAL	
Rayonnement	Seuil ($MJ\ m^{-2}$)		ASH	WON	ASH	WON	ASH	WON	ASH	WON
GLOBAL	0	RMS (%)	31.6	30.0	31.6	29.7	35.6	33.0	32.3	29.9
		N (nb.cas)	14480	14440	15598	15612	13604	13601	14124	14146
	0.36	RMS (%)	33.9	30.9	33.4	32.1	40.0	36.1	34.4	32.0
		N (nb.cas)	10523	10513	11799	11799	9837	9837	10277	10277
	-	I_{ha} ($MJ\ m^{-2}$)	0.910		1.009		0.837		0.974	
DIFFUS	0	RMS (%)	—		—		57.5	57.8	58.4	53.0
		N (nb.cas)	—		—		13282	13279	15495	15516
	-	I_{ha} ($MJ\ m^{-2}$)	—		—		0.450		0.444	

Une sous-estimation très forte et très systématique du modèle de l'ASHRAE aux faibles hauteurs solaires -donc particulièrement importante en hiver- ressort nettement à toutes les stations. Cette observation est compatible avec l'étude de Sowell [3.19] où le même modèle était cependant testé à une station californienne (Riverside), donc dans un climat très différent.

D'autre part, on peut remarquer que la performance des modèles est assez sensible au climat local. Ainsi, le tableau 3.22 permet de constater que les meilleurs résultats en ce qui concerne le RMS du rayonnement global pour les deux modèles sont obtenus à Sept-Iles et Ottawa, et les moins bons à Goose Bay et Montréal. Cela peut éventuellement s'expliquer respectivement par la forte nébulosité du climat de Goose Bay, et par la pollution de Montréal qui entraîne une différence sensible par rapport à Ottawa malgré la proximité de ces deux stations. Cette sensibilité climatique peut être mise sur le compte de la nature en grande partie empirique de ces deux modèles. Il est également certain que la performance du modèle de l'ASHRAE pourrait être significativement améliorée si des valeurs mensuelles du facteur de clarté C_N et des coefficients de la fonction de nébulosité (formule 3.4) étaient déterminés pour chaque région climatique comme dans le cas du modèle de Won.

3.8 Conclusion

L'étude d'évaluation dont les résultats ont été présentés dans ce chapitre fait nettement ressortir la supériorité du modèle de Won à celui de l'ASHRAE. Cette supériorité se vérifie pour les quatre stations et les quatre années considérées, à la fois pour le rayonnement global et pour le rayonnement diffus, mais aussi pour chaque indice statistique. Cela vient donc confirmer les conclusions de Mc Laren et al. [3.7] (qui avaient été obtenues par une étude moins exhaustive), et permet de déconseiller définitivement l'emploi du modèle de l'ASHRAE au Canada en général et au Québec en particulier. Les principaux défauts de ce modèle, tels que révélés par la présente étude sont: une erreur RMS élevée, un comportement irrégulier selon les mois, une précision très dégradée en octobre-novembre-décembre et une forte tendance à la sous-estimation en hiver. De plus, l'analyse pour le seuil de 0.36 MJ m^{-2} montre une dégradation supplémentaire de sa performance. Cela est donc particulièrement préjudiciable aux utilisations énergétiques (simulation des systèmes solaires en particulier) où les effets de seuil revêtent une grande importance.

Ces considérations mènent à la conclusion que les programmes de simulation thermique qui utilisent le modèle de l'ASHRAE ont tendance à générer des résultats erronés au niveau des apports solaires, surtout pendant l'hiver.

Il reste évidemment à quantifier l'influence exacte de l'imprécision du calcul du rayonnement (inhérente à tout modèle) sur l'évaluation des performances thermiques des bâtiments et des systèmes à énergie solaire, ce qui commence seulement à faire l'objet d'études approfondies [3.20].

De plus, s'il est maintenant acquis que l'utilisation du modèle de l'ASHRAE est déconseillée au Canada, il reste à recommander un modèle qui puisse le remplacer. D'après les conclusions précédentes, le modèle de Won est

recommandé lorsqu'un calcul sur le plan horizontal est seul nécessaire [1]. Par contre, dans le cas d'une utilisation énergétique, ce modèle ne convient pas en tant que tel puisqu'il ne permet pas de calculer les composantes du rayonnement sur un plan incliné. Mais il est cependant possible de lui adjoindre un modèle spécifique pour la conversion plan horizontal/plan incliné. Il est recommandé d'utiliser à ce niveau une procédure tenant compte de l'anisotropie du rayonnement diffusé par le ciel (voir par exemple [3.21] à [3.23]). On remarquera à ce sujet que les algorithmes de l'ASHRAE permettent cette conversion, mais qu'ils ne peuvent pas non plus être recommandés à cause d'un vice de forme au niveau du calcul de l'irradiation diffuse par ciel nuageux sur un plan vertical [3.23].

Il apparaît ainsi qu'une étude d'évaluation des modèles de calcul du rayonnement sur des plans inclinés s'avère particulièrement essentielle à la communauté scientifique axée sur les applications énergétiques.

---

1. D'après les résultats d'autres évaluations [3.7, 3.24], les modèles MAC2 ou MAC3 peuvent également être utilisés, puisqu'ils ont des performances voisines de celles du modèle de Won, et même meilleures pour certaines stations au Canada.

3.5 Références

3.1- Hittle D.C., 1977. The Building Loads Analysis and System Thermodynamics Program. BLAST, US Army Const. Eng. Res. Lab., CERL-TR-E-119.

3.2- Bennet G.A. et al., 1977. Cal-ERDA Program Manual, Los Alamos Scientific Laboratory, ANL/ENG-77-04.

3.3- York D.A. et Tucker E.F., eds., 1980. DOE-2 Reference Manual. Lawrence Berkeley Laboratory.

3.4- Kusuda T., 1976. NBLSD, the computer program for heating and cooling loads in buildings. NBS BSS 69.

3.5- Kusuda T., ed., 1976. Procedures for determining heating and cooling loads for computerizing energy calculations. ASHRAE, New-York.

3.6- Won T.K., 1977. The simulation of hourly global radiation from hourly reported meteorological parameters. Canadian Prairie Area. Proc. SESCI Conf., Edmonton.

3.7- Mc Laren J.F. et al., 1980. Define, develop and establish a merged solar and meteorological computer data base. Rpt. 80-8, Canadian Climate Center, Environnement Canada, Downsview, Ont.

3.8- Davies J.A., 1981 Models for estimating incoming solar irradiance. Rpt. 81-2, Canadian Climate Center, Environnement Canada, Downsview, Ont.

3.9- Stephenson D.G., 1965. Equations for solar heat gain through windows. Solar Energy, 9 : 81-86.

3.10- Stephenson D.G., 1967. Tables of solar altitude, azimuth, intensity and heat gain factors for latitudes from 43 to 55 degrees north. DBR paper 243, NRC 9528, Ottawa.

3.11- Threlkeld J.L. et Jordan R.C., 1958. Direct solar radiation available on clear days. ASHRAE Trans., 64 : 45-68.

3.12- Moon P., 1940. Proposed standard solar radiation curves. J. Franklin Inst., 230 : 583-617.

3.13- Kimura K. et Stephenson D.G., 1969. Solar radiation on cloudy days. ASHRAE Trans., 75 : 227-233.

3.14- Lokmanhekim M., ed., 1971. Procedure for determining heating and cooling loads for computerized energy calculations. ASHRAE, New-York.

3.15- Chatigny R., Galanis N., Gueymard C. et Labelle D., 1981. Mise sous forme accessible des fichiers de données atmosphériques horaires en vue de leur utilisation sur ordinateur. Rapport préparé pour la Direction des énergies nouvelles, Québec.

3.16- Latimer J.R., 1972. Radiation measurement. Technical manual # 2, Information Canada.

3.17- Chan C.S.P., 1979. The measurement and modelling of the distribution of the diffuse sky radiance. M.A.S. thesis, University of Toronto.

3.18- Duffie J.A. et Beckman W.A., 1980. Solar engineering of thermal processes. John Wiley, New-York.

3.19- Sowell E.F., 1978. The use and limitations of ASHRAE solar algorithms in solar energy utilization studies. ASHRAE Trans., 84 : 77-93.

3.20- Judkoff R. et al., 1981. A comparative study of four building energy simulations. Proc. 6th Nat. Passive Conf., AS/ISES, Portland.

3.21- Hay J.E., 1979. Study of shortwave radiation on non-horizontal surfaces. Rpt. 79-12. Atmospheric Environment Service, Downsview, Ont.

3.22- Klucher T.M., 1979. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. Solar Energy, 23 : 111-114.

3.23- Gueymard C., 1983. Utilisation des données météorologiques horaires pour le calcul du rayonnement solaire sur des surfaces inclinées et la simulation thermique des bâtiments (à paraître).

3.24- Gueymard C., 1983. Validation of hourly solar radiation models: a threshold analysis for engineering applications (à paraître).

CHAPITRE 4 - EVALUATION DE DEUX MODELES HORAIRES POUR LA SEPARATION DES COMPOSANTES DIRECTE ET DIFFUSE A PARTIR DE L'IRRADIATION GLOBALE

4.1 Introduction

En dehors des programmes de simulation thermique des bâtiments discutés au chapitre 3, il existe plusieurs programmes ayant une approche similaire (utilisant donc des données horaires particulières) mais plutôt destinés à la simulation dynamique des systèmes de chauffage solaire. Ces programmes supposent au moins connue l'irradiation globale sur un plan horizontal, ce qui constitue une restriction importante à leur emploi puisque les stations de mesure sont rares.

Pour les besoins du calcul du rayonnement sur les plans inclinés, l'irradiation horizontale doit d'abord être séparée entre ses composantes directe et diffuse, au moyen d'un modèle correspondant à la classe C11 du tableau 2.1 . L'étape suivante consiste à calculer des facteurs de correction différents pour le rayonnement direct et le rayonnement diffus, de façon à obtenir séparément les composantes du rayonnement incident sur le plan incliné voulu.

Cette étape ne sera pas abordée ici pour les raisons déjà exposées, et seule l'étape de la séparation direct/diffus sera analysée dans ce chapitre.

Par exemple, le programme WATSUN [4.1] utilise le modèle d'Orgill et Hollands [4.2] pour réaliser cette séparation. Le programme TRNSYS a maintenant acquis une réputation certaine dans le domaine de l'énergie solaire. Dans sa version 10.1 considérée ici [4.3], l'utilisateur a le choix entre trois modèles de séparation. Le premier modèle possible (il était d'ailleurs le seul disponible dans la première version de TRNSYS) est basé sur une corrélation obtenue par Liu et Jordan [4.4]. Le deuxième modèle est basé sur une corrélation développée par Boes [4.5]. Cette corrélation intervient également dans le programme de simulation des bâtiments passifs PASOLE [4.6].

Le troisième modèle offert dans TRNSYS résulte d'un assemblage du modèle pour ciel clair de Hottel [4.7] et de la corrélation de Bugler [4.8] obtenue à partir de données australiennes.

Il apparait régulièrement dans la littérature de nouveaux modèles du type de la classe C11, mais la quasi-totalité sont obtenus empiriquement par corrélation, à la manière de Liu et Jordan [4.4]. A la limite, il pourrait donc y avoir au moins autant de formulations que de stations mesurant à la fois les composantes globale et diffuse, d'où un choix de plus en plus difficile pour l'utilisateur. Dans ces conditions, il a semblé suffisant de tester seulement deux modèles représentatifs, à savoir ceux de Liu et Jordan [4.4] et d'Orgill et Hollands [4.2], choisis pour les raisons suivantes:

- Le modèle de Liu et Jordan est un classique du genre et est très utilisé en génie comme la littérature le démontre.
- Le modèle d'Orgill et Hollands repose sur des données de Toronto, et s'avère donc a priori un bon candidat pour une utilisation dans l'est canadien, et plus particulièrement au Québec.
- Le modèle de Boes a été mis au point à partir de données assez anciennes provenant de trois stations américaines, dont deux ont un climat éloigné de celui du Québec; une étude préliminaire (utilisant une partie des données de Montréal et Goose Bay) a montré que sa précision était légèrement inférieure à celle du modèle de Liu et Jordan, tout en étant nettement supérieure à celle de la combinaison Hottel/Bugler; de plus, du fait que le choix existe dans TRNSYS, il est finalement apparu que l'évaluation détaillée du modèle de Boes était moins prioritaire que celle du modèle de Liu et Jordan.

4.2 Description des modèles de Liu & Jordan et d'Orgill & Hollands

Le modèle de Liu et Jordan [4.4] utilisé dans TRNSYS a été obtenu par corrélation de données mesurées à Blue Hill, Mass., de 1947 à 1956. Il est important de souligner qu'il a été développé à partir de données journalières moyennes, et a été incorporé dans TRNSYS, pour être appliqué à des données horaires particulières, ce qui constitue une extrapolation discutable a priori. De plus, les données utilisées par Liu et Jordan ont été obtenues avec des appareils de mesure moins précis que les appareils actuels, et il s'est avéré que les mesures de rayonnement diffus n'avaient pas été corrigées pour tenir compte de la présence du diffusographe [4.9], ce qui représente donc d'autres sources d'erreur.

Originallement, la corrélation n'était présentée que sous forme graphique, mais Klein [4.9] en a donné une expression analytique obtenue par lissage polynomial. La formule essentielle du modèle, telle qu'utilisée dans TRNSYS, s'écrit:

$$I_d/I = 1.0045 + 0.04349\ K_T - 3.5227\ K_T^2 + 2.6313\ K_T^3 \quad \text{pour } K_T < 0.75 \qquad (4.1)$$

$$I_d/I = 0.1657 \quad \text{pour} \quad K_T \geq 0.75$$

où la variable indépendante (connue a priori) est $K_T = I/I_o$ (I est l'irradiation horaire globale et I_o l'irradiation horaire extraterrestre, comme au chapitre 3).

Le modèle d'Orgill et Hollands [4.2] utilisé dans Watsun se présente sous une forme semblable, la formule essentielle s'écrivant ici:

$$I_{d/I} = 1 - 0.248857\ K_T \quad , \quad K_T < 0.35$$

$$I_{d/I} = 1.55699 - 1.840127\ K_T \quad , \quad 0.35 \leq K_T < 0.75 \qquad (4.2)$$

$$I_{d/I} = 0.1769 \quad K_T \geq 0.75$$

Les équations (4.1) et (4.2) sont représentées à la figure 4.1 pour fins de comparaison.

Les deux modèles ont d'autre part une même formulation en ce qui concerne le calcul de la déclinaison δ et de I_o (les algorithmes complets apparaissent à l'annexe 1).

4.3 Procédures de calcul et méthodologie

La méthodologie adoptée au chapitre 3 est reprise ici, ainsi que l'ensemble des mêmes indices statistiques, sans considération de seuil. Comme au paragraphe 3.6, seules les stations de Montréal et Goose Bay ont pu être utilisées, puisqu'il s'agit de tester le calcul du rayonnement diffus. D'autre part, la période d'étude a été portée à six années (1973-1978) puisqu'il n'y a plus ici de limitations dues à l'observation de la couverture nuageuse.

Les erreurs RMS ont été normalisées par l'irradiation diffuse moyenne calculée sur ces six années, comme au chapitre 3, ce qui permet une comparaison directe des quatre modèles étudiés dans ces deux chapitres.

4.4 Résultats

Les tableaux 4.1 à 4.3, ainsi que la figure 4.2 montrent à l'évidence une supériorité très nette du modèle d'Orgill & Hollands en ce qui concerne l'erreur RMS, celle-ci étant inférieure à celle du modèle de Liu & Jordan pour tous les mois et pour les deux stations.

Pour le critère du biais à l'estimation, c'est encore le modèle d'Orgill & Hollands qui obtient systématiquement la meilleure performance (tableaux 4.4 et 4.5, figures 4.3 à 4.8). Il est cependant à noter que ce modèle a malgré tout une forte tendance à la sous-estimation pendant l'hiver, surtout à Goose Bay. Cette tendance est encore bien pire pour le modèle de Liu et Jordan, puisque sa proportion d'erreurs négatives dépasse 90% de décembre à avril à Goose Bay, et se maintient entre 60 et 88% à Montréal en moyenne sur la période 1973-1978.

Ce résultat est à rapprocher de celui obtenu dans une autre étude [4.10] où l'utilisation de ce modèle dans le programme TRNSYS entraînait une sous-estimation considérable (surtout en hiver), par rapport à des données mesurées à Gaithersburg (Maryland) sur un plan incliné à 39 degrés au sud[1].

La répartition horaire de l'erreur RMS_h apparaît à la figure 4.9 pour Montréal. Des répartitions horaires de même type ont été obtenues à Goose Bay.

---

1. Il faut noter que dans le programme TRNSYS, la conversion plan horizontal/plan incliné pour le rayonnement diffus est calculée sans tenir compte de l'anisotropie, ce qui tend également à sous-estimer le rayonnement incident sur une surface sud, surtout en hiver. Le programme WATSUN tient compte de cette anisotropie et offre donc de meilleures garanties de précision sur l'ensemble du calcul du rayonnement.

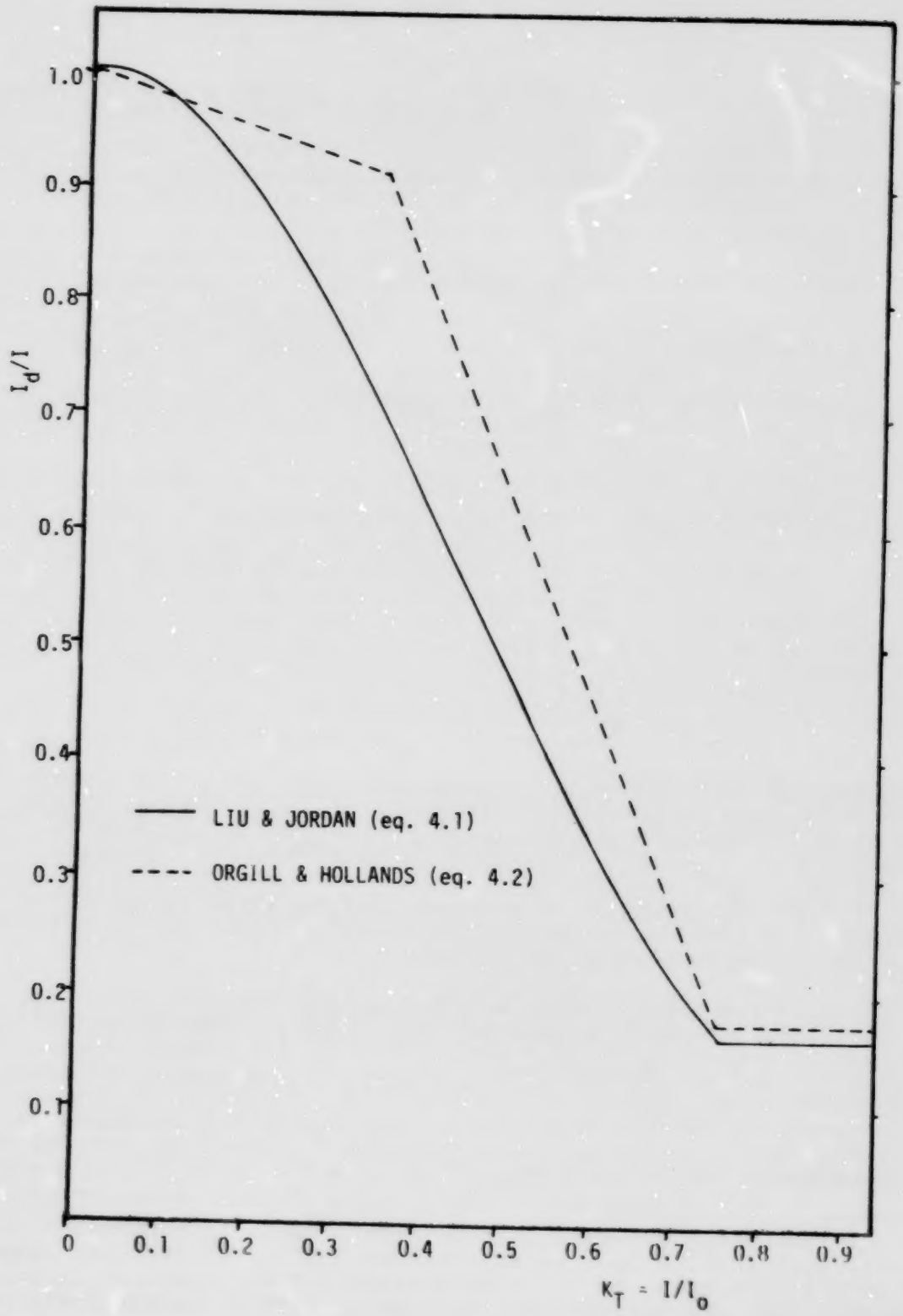


Figure 4.1 - Calcul du rayonnement diffus selon les modèles de Liu & Jordan et Orgill & Hollands.

Tableau 4.1 - Récapitulation des erreurs RMS horaires normalisées pour le rayonnement diffus à Montréal avec les modèles de Liu & Jordan (LJ) et Orgill & Hollands (OH).

MODELES : TRNSYS & WATSON
VILLE : MONTREAL

ERREUR RMS HORAIRE (%)
RAYONNEMENT DIFFUS

	SEUIL	1973 LJ	1973 OH	1974 LJ	1974 OH	1975 LJ	1975 OH	1976 LJ	1976 OH	1977 LJ	1977 OH	1978 LJ	1978 OH	1973 - 1978 LJ	1973 - 1978 OH
JANVIER	0.00	40.9	25.2	54.0	33.5	45.4	30.7	62.3	42.8	70.3	49.8	68.7	50.8	58.0	40.0
	0.36	69.3	39.9	83.1	51.1	74.1	48.6	93.6	63.9	91.7	65.2	95.2	69.6	86.6	59.0
FEVRIER	0.00	33.6	24.7	52.0	31.8	0.0	0.0	49.7	32.1	66.7	49.2	63.9	44.2	56.6	38.9
	0.36	56.3	37.9	75.5	45.5	0.0	0.0	70.7	45.5	85.6	63.1	90.7	61.6	79.8	54.1
MARS	0.00	41.8	25.3	46.1	33.6	0.0	0.0	57.2	39.7	64.3	42.6	50.4	37.1	52.4	36.1
	0.36	59.6	33.6	61.2	43.7	0.0	0.0	74.2	51.3	82.0	53.7	74.9	51.8	71.2	47.7
AVRIL	0.00	38.6	28.5	50.7	31.1	0.0	0.0	49.9	30.9	46.4	29.1	50.3	34.6	47.4	30.9
	0.36	52.0	34.8	68.5	40.8	0.0	0.0	60.4	36.9	58.1	35.1	67.6	43.3	61.5	38.2
MAI	0.00	35.6	28.0	47.7	33.3	0.0	0.0	49.8	31.8	47.3	32.0	51.1	34.5	47.1	32.2
	0.36	48.5	34.5	62.5	42.5	0.0	0.0	62.3	39.3	58.8	37.9	69.3	39.7	59.5	39.2
JUIN	0.00	49.6	35.1	50.3	33.5	39.0	26.5	49.2	31.2	48.5	32.3	42.4	27.6	47.0	31.4
	0.36	60.7	39.6	58.1	38.0	44.2	29.3	57.8	36.0	58.1	37.7	52.9	31.6	56.1	35.9
JUILLET	0.00	35.3	29.6	48.7	33.0	48.1	30.2	48.1	31.6	44.3	28.4	47.1	34.7	45.6	31.3
	0.36	41.4	32.3	57.8	37.2	55.6	34.0	58.9	37.2	54.3	32.3	58.6	38.1	54.8	35.2
AOUT	0.00	52.6	32.3	38.3	28.3	36.8	25.1	43.1	28.1	43.7	28.1	45.5	36.4	43.7	29.9
	0.36	60.4	36.2	49.3	29.0	44.8	27.9	53.9	32.7	54.5	33.3	58.2	40.0	53.9	33.4
SEPTEMBRE	0.00	50.2	37.6	40.7	30.6	39.0	30.1	39.5	32.2	44.9	30.8	38.8	35.5	42.4	33.2
	0.36	65.4	44.6	50.5	35.0	50.9	33.9	56.3	40.7	58.4	36.2	51.4	34.3	55.6	37.6
OCTOBRE	0.00	41.2	43.9	42.7	35.1	34.1	26.8	36.6	34.1	35.7	29.3	34.1	36.0	37.5	34.6
	0.36	61.3	49.4	62.5	40.2	49.4	27.7	51.2	32.3	55.2	36.3	49.1	37.8	55.0	37.7
NOVEMBRE	0.00	37.5	27.5	42.8	33.5	33.8	34.9	35.3	26.8	46.8	30.9	45.4	51.7	40.7	35.6
	0.36	57.6	34.9	72.5	44.6	54.6	35.3	50.9	33.1	73.2	39.8	65.8	39.8	62.8	38.0
DECEMBRE	0.00	29.0	23.8	46.4	30.2	47.6	33.1	53.6	38.3	40.3	29.8	52.0	35.1	45.6	32.0
	0.36	55.6	28.2	83.1	52.8	82.7	55.2	91.1	60.9	66.9	35.5	93.5	58.9	81.1	51.1

Tableau 4.2 - Récapitulation des erreurs RMS horaires normalisées pour le rayonnement diffus à Goose Bay avec les modèles de Liu & Jordan (LJ) et Orgill & Hollands (OH).

MODELES : TRNSYS & BATSUR
VILLE : GOOSE BAY

ERREUR RMS HORAIRE (%)
RAYONNEMENT DIFFUS

	SEUIL	1973 LJ	1973 OH	1974 LJ	1974 OH	1975 LJ	1975 OH	1976 LJ	1976 OH	1977 LJ	1977 OH	1978 LJ	1978 OH	1973 - 1978 LJ	1973 - 1978 OH
JANVIER	0.00	89.9	45.0	68.2	53.7	50.4	36.4	50.0	33.1	52.1	34.7	70.2	52.5	59.2	43.6
	0.36	102.9	76.9	116.5	90.9	93.4	64.5	85.5	54.1	91.7	60.7	115.3	87.6	102.9	75.2
FEVRIER	0.00	66.0	38.5	70.6	52.5	56.0	42.3	44.8	31.6	54.4	35.4	72.5	49.5	59.6	41.7
	0.36	75.8	51.9	90.1	67.3	85.2	62.1	72.5	50.8	80.8	52.7	90.4	61.8	83.3	58.3
MARS	0.00	55.2	40.5	64.3	49.2	58.3	39.2	55.6	39.4	66.8	49.2	79.5	61.0	63.2	46.5
	0.36	72.0	52.9	77.0	59.9	71.4	48.1	71.6	50.8	85.7	63.1	99.0	76.1	79.5	58.5
AVRIL	0.00	53.1	47.1	70.1	55.9	59.2	46.1	66.8	50.2	63.1	45.6	78.3	60.5	66.0	50.3
	0.36	73.1	54.5	81.4	64.6	70.7	54.7	77.2	57.8	74.8	53.9	89.3	69.1	77.1	58.6
MAI	0.00	52.0	36.3	65.2	50.5	56.9	41.3	52.1	36.0	57.6	38.9	69.9	53.5	59.2	42.7
	0.36	67.9	45.0	80.7	63.0	68.7	49.5	65.7	44.8	69.7	46.9	92.0	72.0	73.9	52.7
JUIN	0.00	41.1	28.6	40.5	31.3	52.5	37.7	50.9	35.2	43.6	29.7	51.5	33.7	47.4	33.0
	0.36	50.9	33.1	54.4	38.4	71.6	49.6	63.6	42.5	54.7	33.7	67.6	42.6	61.3	40.5
JUILLET	0.00	41.7	27.6	0.0	0.0	37.5	27.7	37.9	24.2	35.2	23.1	53.3	35.0	43.2	28.9
	0.36	51.9	32.1	0.0	0.0	48.1	33.7	50.8	30.2	50.6	31.9	67.1	41.5	55.5	35.0
AOUT	0.00	44.3	28.7	0.0	0.0	50.0	47.3	36.7	26.3	42.6	25.0	41.6	26.8	45.7	33.3
	0.36	56.6	44.5	0.0	0.0	77.5	60.0	52.3	34.0	54.1	30.5	53.1	31.1	59.3	41.2
SEPTEMBRE	0.00	74.5	55.6	0.0	0.0	31.0	22.2	38.5	24.5	43.3	25.1	42.8	27.0	47.0	32.3
	0.36	93.4	69.0	0.0	0.0	47.0	30.7	56.7	36.4	57.2	31.7	53.4	31.4	63.8	42.3
OCTOBRE	0.00	68.0	51.4	0.0	0.0	47.7	38.3	47.1	29.7	43.2	30.1	42.6	25.8	49.7	35.9
	0.36	85.1	73.6	0.0	0.0	76.3	57.4	66.0	35.8	66.0	42.6	62.9	32.8	74.4	51.0
NOVEMBRE	0.00	62.9	47.1	0.0	0.0	42.1	29.4	38.5	27.1	38.9	33.9	0.0	0.0	46.8	35.3
	0.36	118.6	86.4	0.0	0.0	81.4	53.4	70.1	35.7	83.7	54.3	0.0	0.0	91.9	61.8
DECEMBRE	0.00	68.6	32.8	42.5	24.2	40.9	25.8	43.5	29.6	50.5	34.4	50.5	29.0	48.1	29.6
	0.36	100.0	66.7	75.9	33.6	85.5	52.7	96.2	62.4	104.3	74.2	91.9	53.2	94.5	60.2

Tableau 4.3- Récapitulation des erreurs RMS annuelles aux différentes stations pour le rayonnement diffus, et irradiation moyenne annuelle I_{ha}. Ensemble des valeurs horaires de la période 1973-1978 .

	GOOSE BAY		MONTREAL	
	L & J	O & H	L & J	O & H
RMS (%)	57.6	41.8	48.2	33.6
N (nb. de cas)	18772		21427	
I_{ha} (MJ m^{-2})	0.450		0.444	

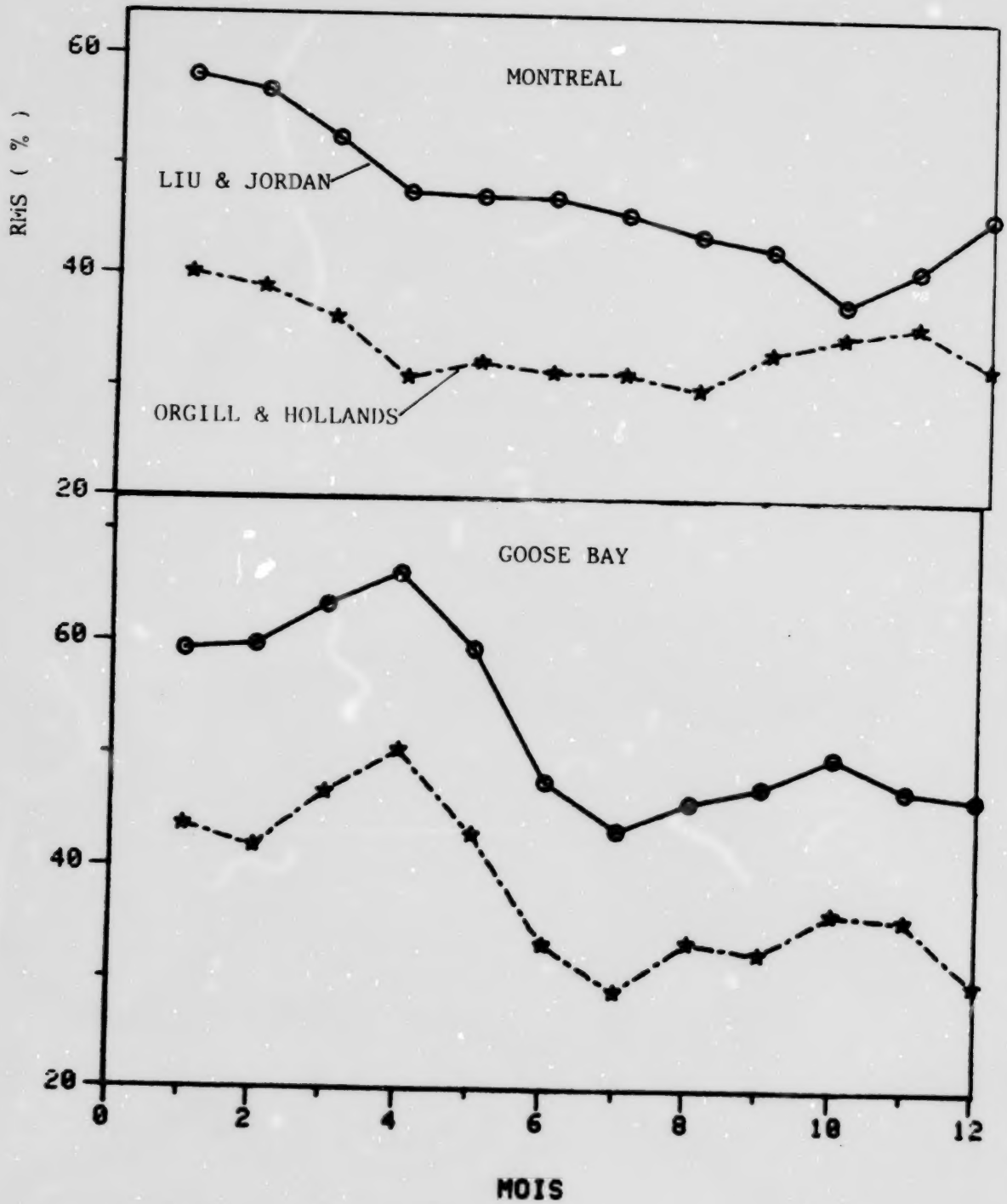


Figure 4.2 - Variation mensuelle des erreurs RMS pour le rayonnement diffus, 1973-1978.

Tableau 4.4 - Récapitulation des fréquences d'erreurs négatives (sous-estimation) pour le rayonnement diffus à Montréal avec les modèles de Liu & Jordan (LJ) et Orgill & Hollands (OH).

MODELES : TRNSYS & WATSUN
VILLE : MONTREAL

PROPORTION DES ERREURS HORAIRES NEGATIVES (%)
RAYONNEMENT DIFFUS

	SEUIL	1973 LJ	1973 OH	1974 LJ	1974 OH	1975 LJ	1975 OH	1976 LJ	1976 OH	1977 LJ	1977 OH	1978 LJ	1978 OH	1973 - 1978 LJ	1973 - 1978 OH
JANVIER	0.00	80.4	68.8	94.0	84.7	88.2	71.4	94.9	83.3	94.6	86.7	74.8	61.3	88.0	76.2
	0.36	100.0	94.6	100.0	96.0	97.6	90.5	100.0	98.0	100.0	95.6	99.1	95.7	99.5	95.2
FEVRIER	0.00	76.7	56.3	79.1	60.5	0.0	0.0	96.9	87.9	91.6	85.3	74.4	59.7	84.8	71.9
	0.36	97.1	79.4	100.0	95.0	0.0	0.0	98.4	96.0	96.0	96.7	100.0	96.6	98.9	95.0
MARS	0.00	72.6	58.4	77.7	65.8	0.0	0.0	87.2	76.8	88.8	68.4	48.2	32.8	74.7	60.4
	0.36	92.9	71.6	88.6	78.9	0.0	0.0	96.9	85.4	98.2	79.9	85.8	67.9	92.8	77.5
AVRIL	0.00	62.6	42.6	69.4	49.1	0.0	0.0	81.9	59.2	81.3	60.1	62.1	46.8	71.6	51.6
	0.36	82.6	55.6	89.9	68.6	0.0	0.0	89.8	68.9	90.2	65.6	86.5	70.2	88.0	66.0
MAI	0.00	57.8	41.3	67.5	46.9	0.0	0.0	72.1	52.5	73.3	50.9	81.6	54.8	71.1	49.7
	0.36	77.6	54.5	83.5	58.9	0.0	0.0	88.4	63.5	81.2	60.9	88.4	65.0	84.5	61.2
JUIN	0.00	68.0	48.1	74.1	52.8	62.0	33.7	78.6	60.5	84.8	67.4	71.9	54.0	74.0	54.0
	0.36	89.8	60.4	84.9	60.4	76.2	45.0	88.0	66.4	92.4	67.5	90.2	66.1	87.4	62.2
JUILLET	0.00	64.9	35.4	73.5	48.8	82.0	52.8	81.6	60.6	75.6	58.5	60.9	40.9	73.5	49.9
	0.36	76.7	41.1	87.0	60.5	90.1	60.4	94.7	68.2	91.6	70.2	88.5	61.7	88.2	60.4
AOUT	0.00	85.3	62.7	81.3	40.1	70.4	40.4	76.7	57.6	80.1	58.0	57.5	39.6	71.9	49.7
	0.36	93.4	68.2	86.1	56.1	84.2	46.9	89.9	64.5	93.3	65.6	87.3	61.5	89.3	60.7
SEPTEMBRE	0.00	68.8	49.1	74.1	43.3	66.2	50.9	67.8	57.3	76.1	53.9	48.8	33.5	66.0	46.7
	0.36	84.2	54.1	90.3	47.8	88.4	59.3	89.1	65.2	89.3	54.4	83.2	57.7	87.3	55.4
OCTOBRE	0.00	50.3	32.9	64.4	44.0	68.7	46.5	72.6	57.4	66.5	52.9	56.5	41.9	63.2	46.0
	0.36	83.6	52.6	94.0	61.2	93.0	51.6	90.2	59.8	92.5	57.5	84.7	50.8	89.8	55.7
NOVEMBRE	0.00	78.2	65.5	63.6	51.7	49.4	32.0	85.8	68.8	78.6	70.1	54.1	39.7	67.7	54.0
	0.36	91.3	66.7	92.3	59.2	93.4	52.6	96.2	68.9	96.7	75.6	92.6	61.7	94.0	66.2
DECEMBRE	0.00	69.8	55.6	75.0	60.1	88.9	65.5	90.4	74.6	63.3	43.1	75.0	62.5	77.1	60.4
	0.36	98.1	72.2	100.0	94.6	98.6	85.7	100.0	90.9	100.0	84.3	100.0	93.2	99.5	87.6

Tableau 4.5 - Récapitulation des fréquences d'erreurs négatives (sous-estimation) pour le rayonnement diffus à Goose Bay avec les modèles de Liu & Jordan (LJ) et Orgill & Hollands (OH).

MODÈLES : TRNSYS & WATSUN
VILLE : GOOSE BAY

PROPORTION DES ERREURS HORAIRES NÉGATIVES (%)
RAYONNEMENT DIFFUS

	SEUIL	1973 LJ	1973 OH	1974 LJ	1974 OH	1975 LJ	1975 OH	1976 LJ	1976 OH	1977 LJ	1977 OH	1978 LJ	1978 OH	1973 - 1978 LJ	1973 - 1978 OH
JANVIER	0.00	94.8	86.2	98.1	90.0	96.6	77.7	97.3	84.3	91.9	70.8	97.6	84.7	96.0	82.5
	0.36	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	97.1	100.0	100.0	100.0	95.8	100.0	100.0	100.0	99.0
FEVRIER	0.00	93.4	82.0	99.3	96.5	99.5	86.6	95.1	78.3	94.7	77.9	96.2	85.1	96.2	82.7
	0.36	100.0	94.5	100.0	100.0	100.0	97.8	100.0	98.6	100.0	96.7	99.2	98.5	99.8	97.6
MARS	0.00	93.2	81.0	99.6	91.5	97.4	85.8	93.9	81.1	86.3	77.7	94.4	85.6	93.9	83.6
	0.36	96.6	91.1	100.0	95.5	100.0	97.1	97.8	91.3	99.9	94.7	98.7	96.9	98.7	94.4
AVRIL	0.00	93.6	84.7	91.6	77.5	91.7	82.3	96.7	89.2	86.4	77.7	92.6	85.8	92.2	82.7
	0.36	97.5	91.4	93.4	85.5	99.6	94.7	97.8	95.5	94.5	91.3	94.8	93.3	96.4	91.9
MAI	0.00	75.6	63.0	72.6	54.7	80.4	66.8	81.5	68.0	89.3	81.7	71.1	60.3	79.8	66.3
	0.36	91.6	81.1	93.6	83.4	91.6	80.4	93.1	78.2	95.3	85.6	90.4	86.1	92.8	82.0
JUIN	0.00	79.6	60.2	56.0	39.1	64.2	40.0	80.0	62.9	74.5	62.6	91.5	75.0	73.6	57.4
	0.36	91.9	80.4	82.7	59.3	86.6	66.1	92.7	86.1	94.5	80.5	95.8	86.8	91.4	70.7
JUILLET	0.00	75.4	58.0	0.0	0.0	75.1	47.7	75.8	57.0	70.2	63.2	76.8	64.5	75.4	56.0
	0.36	92.8	88.8	0.0	0.0	93.8	86.1	91.3	85.2	96.2	84.9	90.1	74.5	92.1	68.3
AOUT	0.00	69.8	46.1	0.0	0.0	70.1	54.0	66.1	50.5	83.0	69.4	78.8	65.1	73.5	56.8
	0.36	90.0	82.1	0.0	0.0	91.6	70.0	95.1	88.5	95.2	78.8	95.4	74.8	93.5	70.9
SEPTEMBRE	0.00	79.2	64.1	0.0	0.0	58.8	40.5	80.5	70.7	78.9	66.7	87.8	68.1	77.1	62.1
	0.36	93.8	83.9	0.0	0.0	90.1	55.0	95.9	82.1	96.3	78.8	95.2	73.4	94.5	75.3
OCTOBRE	0.00	82.2	63.6	0.0	0.0	66.7	43.5	83.1	72.0	78.1	64.7	81.0	73.3	77.9	63.0
	0.36	99.2	91.3	0.0	0.0	97.2	71.0	100.0	85.5	96.7	78.3	99.1	84.5	98.5	80.3
NOVEMBRE	0.00	68.6	47.3	0.0	0.0	83.9	59.6	76.7	54.0	72.6	60.8	0.0	0.0	75.5	57.9
	0.36	100.0	91.5	0.0	0.0	98.0	39.6	100.0	75.9	100.0	86.1	0.0	0.0	95.5	85.9
DECEMBRE	0.00	87.0	68.6	94.6	87.4	96.6	80.9	83.0	66.3	89.0	70.5	92.6	81.6	90.3	70.7
	0.36	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	92.0	100.0	100.0	100.0	96.7	100.0	97.9

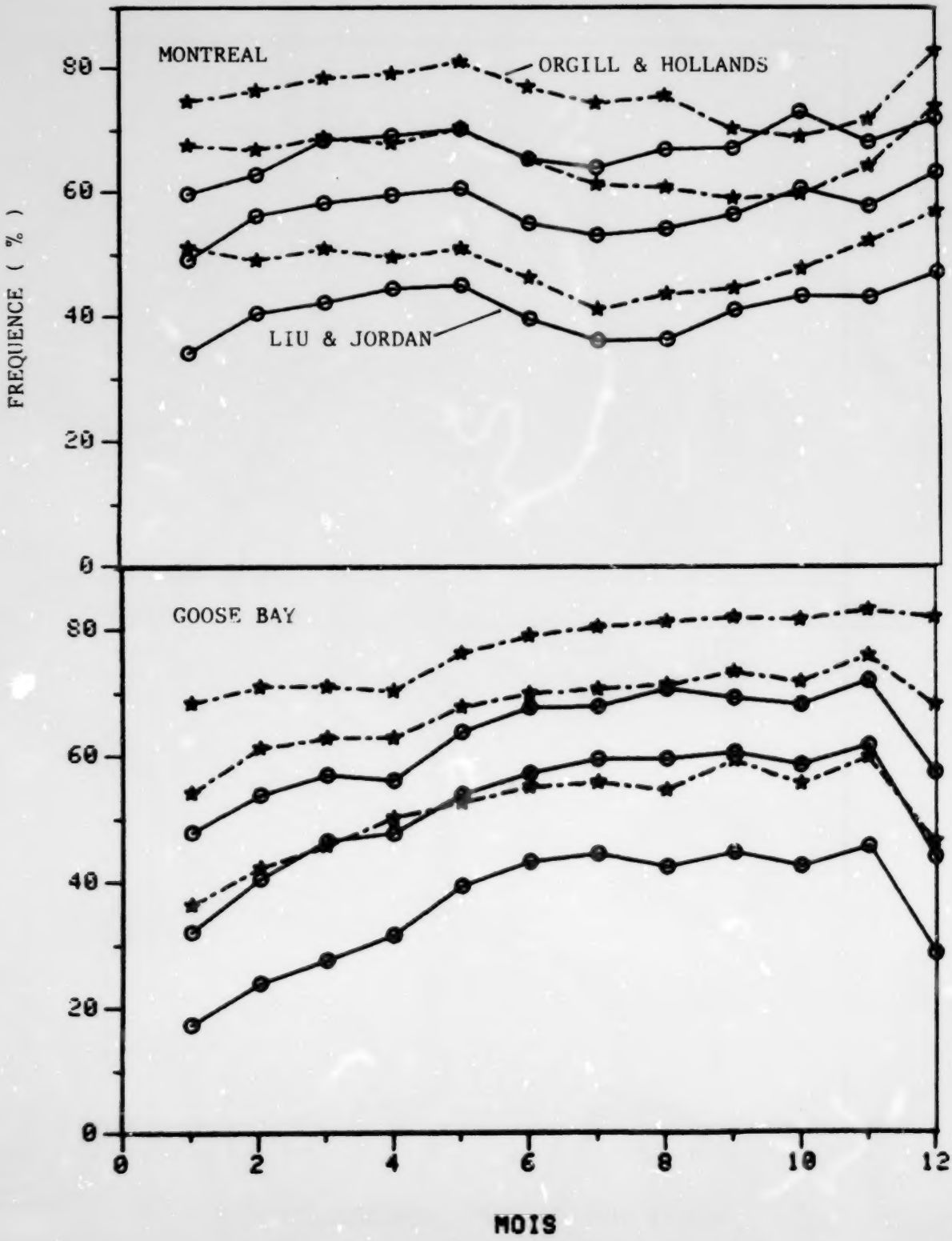


Figure 4.3 - Fréquence des erreurs relatives inférieures à 10, 20 et 30% en valeur absolue, pour le rayonnement diffus.

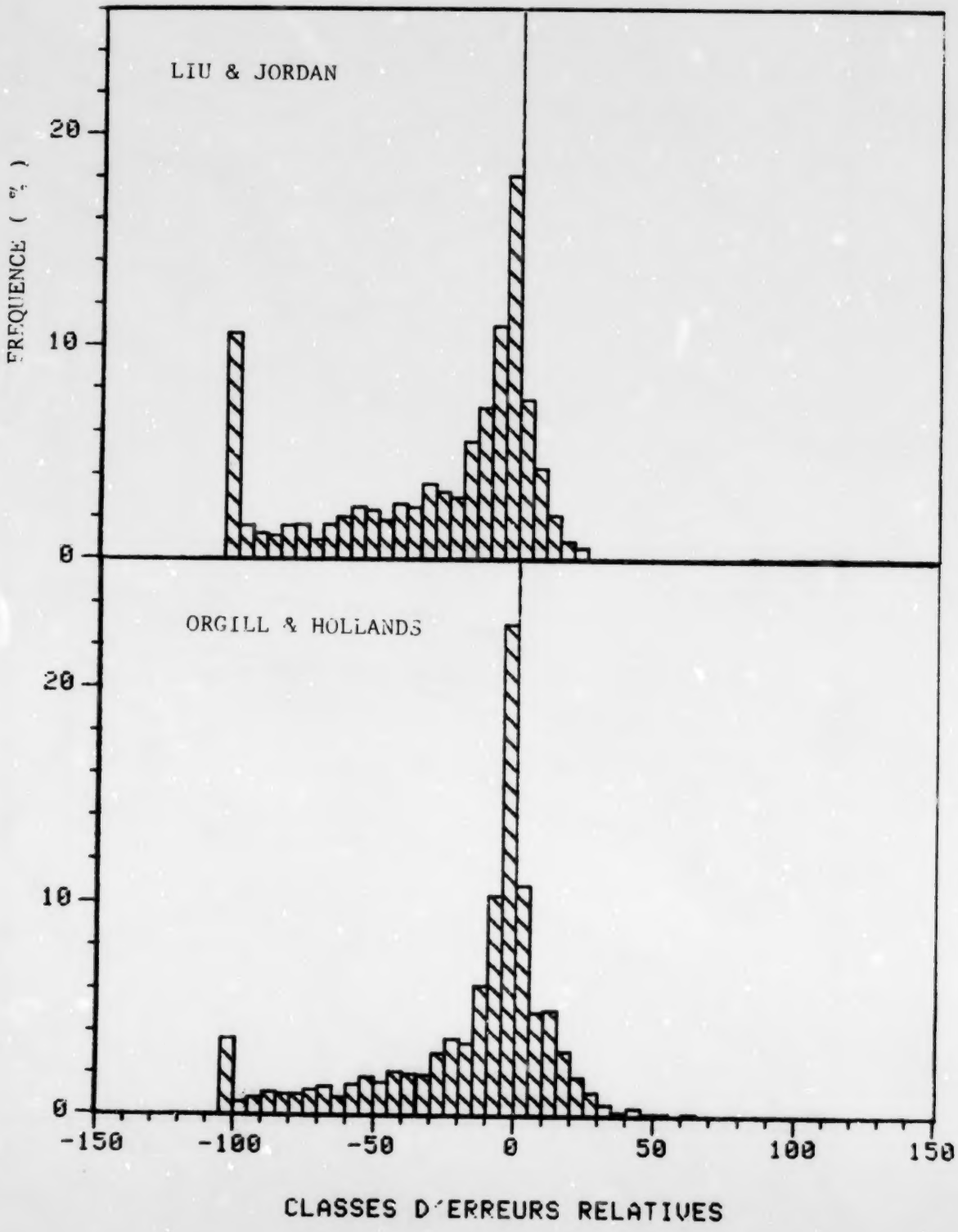


Figure 4.4 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour le rayonnement diffus à Montréal (février).

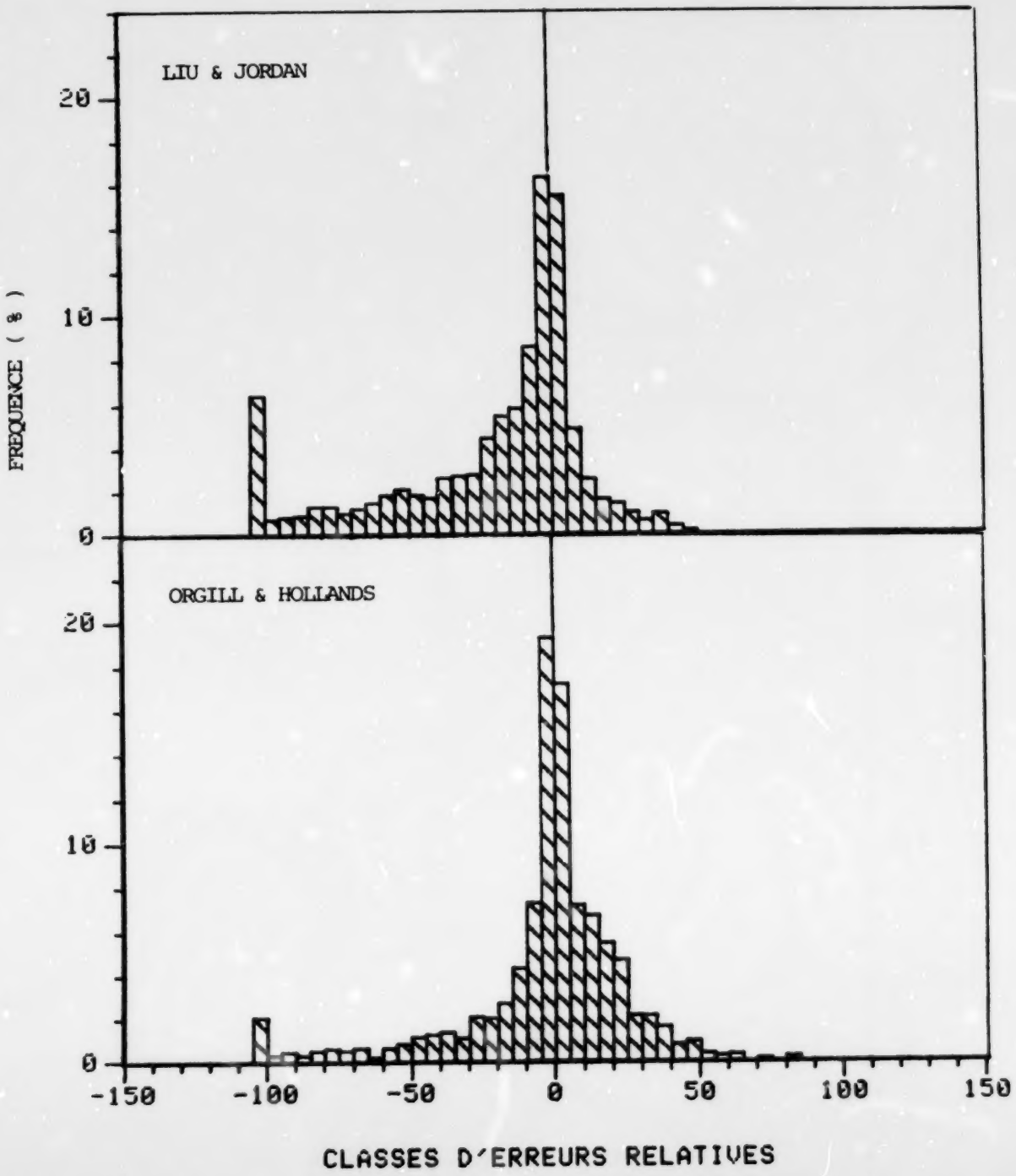


Figure 4.5 - Histogrammes des fréquences d'erreurs relatives pour le rayonnement diffus à Montréal (mai).

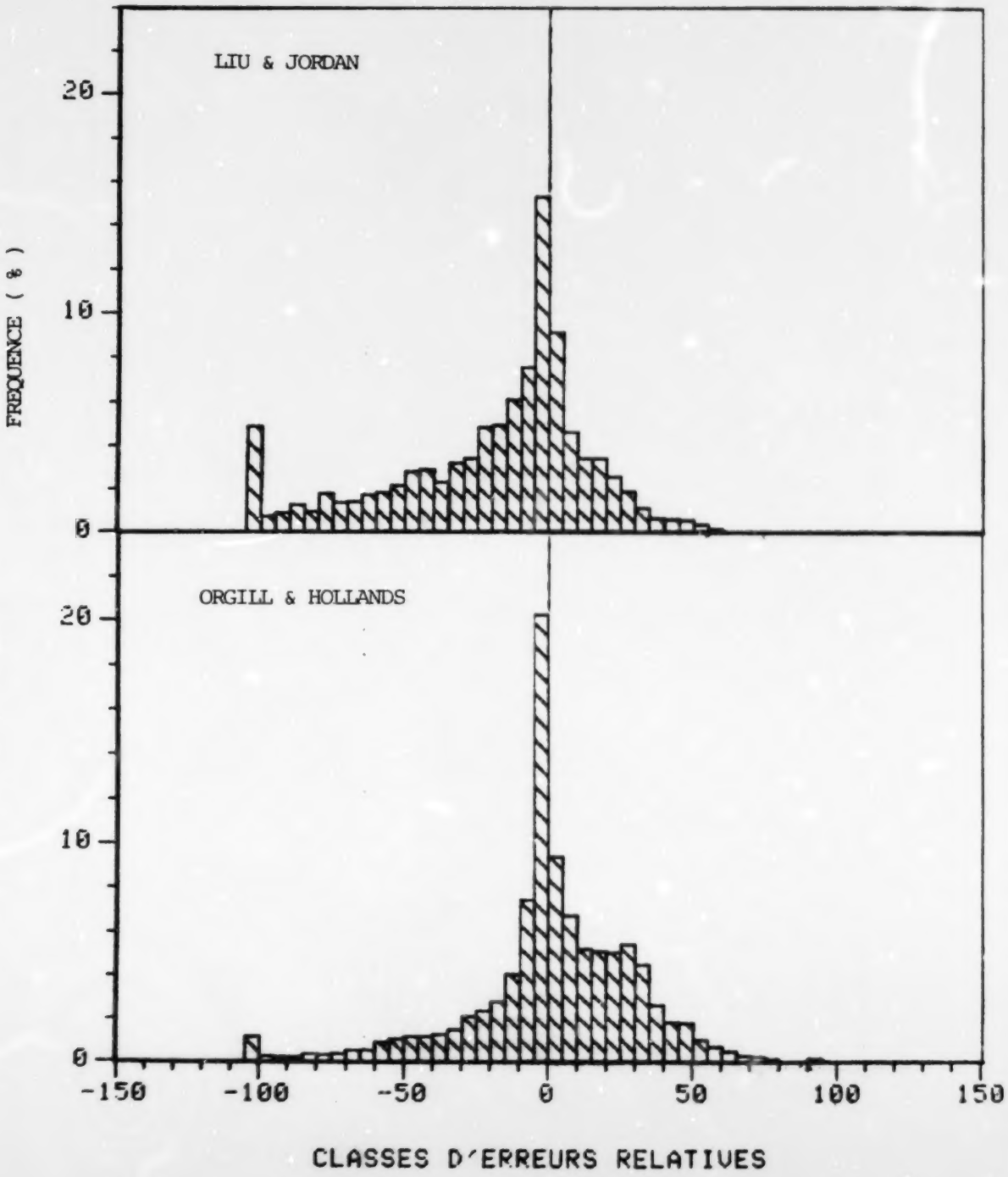


Figure 4.6 - Histogrammes des erreurs relatives pour le rayonnement diffus à Montréal (août).

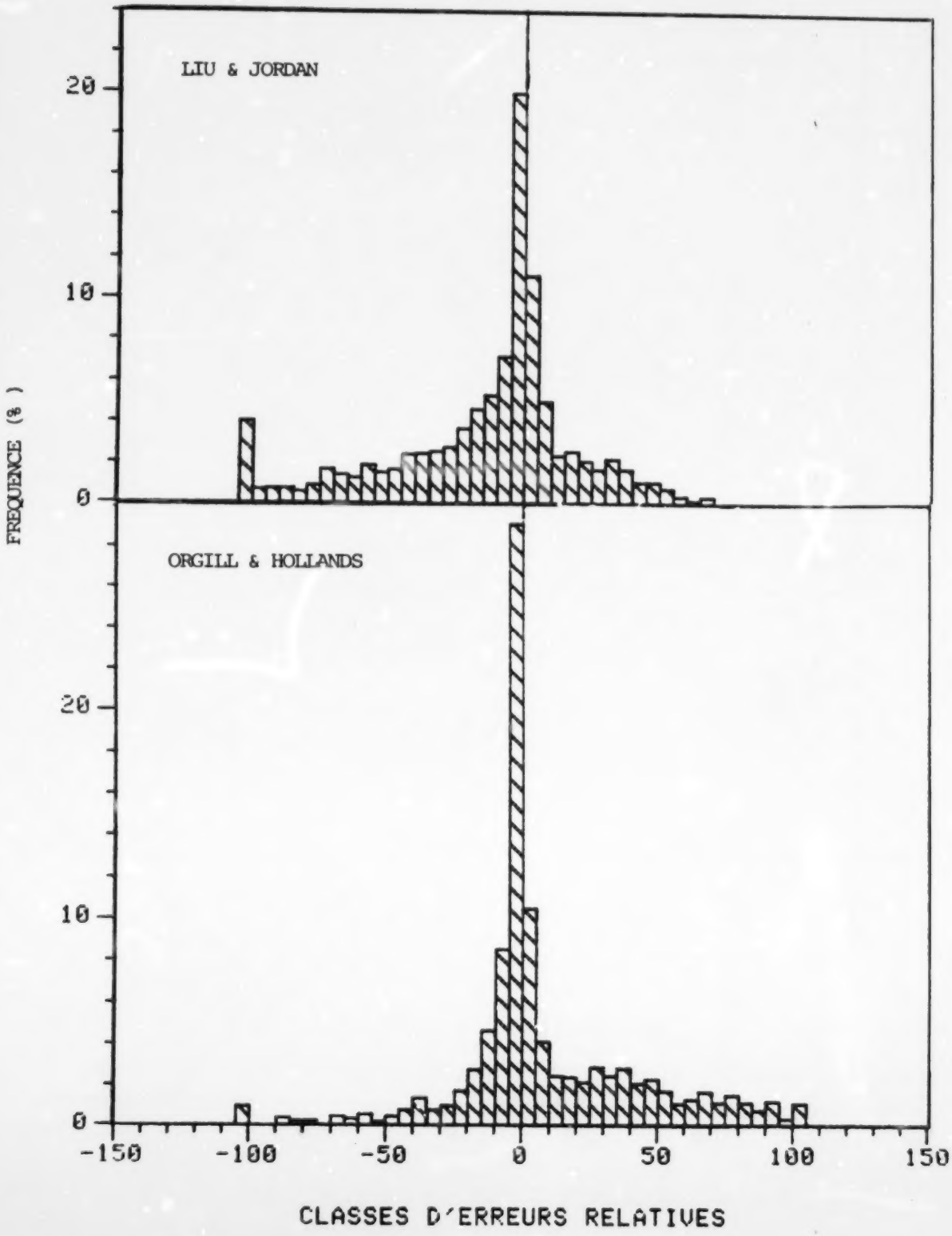


Figure 4.7 - Histogrammes des fréquences des erreurs relatives pour le rayonnement diffus à Montréal (novembre).

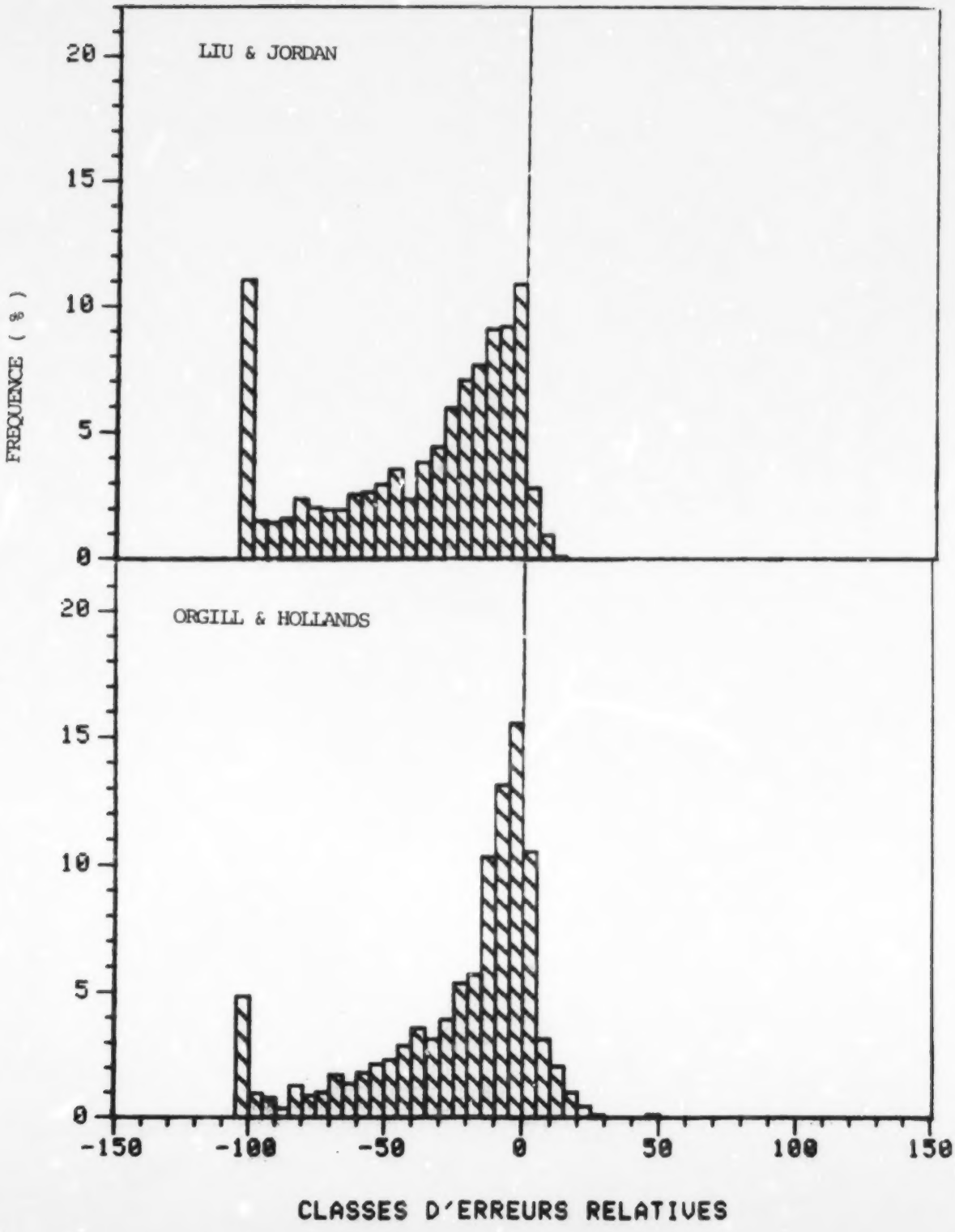


Figure 4.8 - Histogrammes des fréquences des erreurs relatives pour le rayonnement diffus à Goose Bay (février).

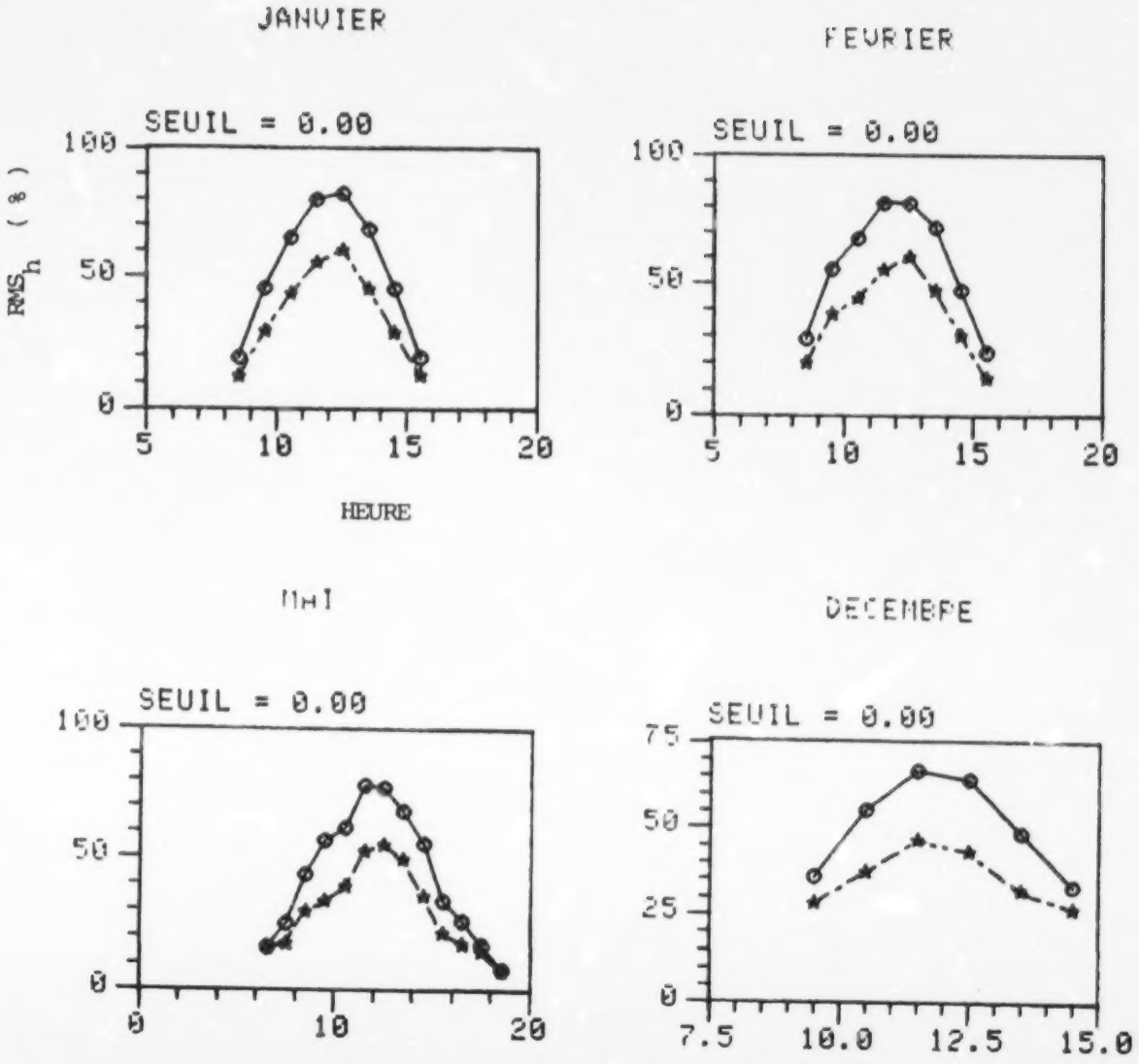


Figure 4.9 - Variation horaire de RMS_h pour le rayonnement diffus à Montréal, 1973-1978.

En ce qui concerne plus spécifiquement les conditions hivernales des mois de décembre-janvier-février (tableaux 4.6, 4.7), la supériorité du modèle d'Orgill & Hollands est confirmée de façon incontestable pour les deux stations et toutes les années, surtout avec le critère de l'erreur RMS.

Finalement, la comparaison des tableaux 3.20, 4.1 et 4.2 indique qu'à Montréal, le modèle d'Orgill & Hollands obtient le meilleur RMS pour tous les mois. A Goose Bay par contre, le modèle de Won s'avère supérieur pendant les quatre premiers mois de l'année. On remarquera aussi aux deux stations les résultats nettement moins bons des modèles de Liu & Jordan et de l'ASHRAE comparativement à ceux de Won et d'Orgill & Hollands.

4.5 Conclusion

En suivant une procédure d'évaluation statistique identique à celle du chapitre 3, il apparaît de façon très nette que le modèle d'Orgill et Hollands offre une précision très supérieure à celui de Liu et Jordan, dans les conditions climatiques représentées par les stations de Montréal et Goose Bay.

Pour le Québec et l'est canadien, il est donc recommandé de suivre la procédure utilisée dans le programme WATSUN plutôt que celle de TRNSYS pour séparer les composantes diffuse et directe lorsque des mesures de rayonnement global son disponibles. Ceci implique quelques modifications au processeur de rayonnement du programme TRNSYS, en particulier le remplacement de l'équation (4.1) par (4.2), ce qui ne présente aucune difficulté.

Les utilisateurs de ces programmes de simulation thermique doivent cependant s'attendre à une sous-estimation des apports solaires pendant l'hiver, et à une accentuation de ce phénomène en climat plus nordique et nuageux (Goose Bay). La quantification de cette tendance au pessimisme reste cependant à évaluer pour des systèmes solaires typiques, ce qui réjoint les conclusions du chapitre précédent.

Enfin, on notera que les résultats décevants du modèle de Liu et Jordan peuvent résulter d'un ensemble de causes répertoriées au paragraphe 4.2, parmi lesquelles il semble que l'utilisation de valeurs horaires plutôt que journalières puisse avoir un rôle prépondérant.

Tableau 4.6 - Compilation des résultats pour trois mois d'hiver à Montréal (rayonnement diffus).

```
VILLE       : MONTREAL
PERIODE     : 1973 - 1978                    ANALYSE DES MODELES DE CALCUL
RAYONNEMENT : DIFFUS                         DU RAYONNEMENT SOLAIRE
MODELES     : TRNSYS & WATSUN
MOIS        : JANVIER                        IHM =  0.31 MJ/(H-M**2)

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

                    SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

  ERREUR RMS        : ORGILLS ET HOLLANDS
                      (  58.0% ,  40.0% )
                      CONFIRME 6 ANNEES SUR 6

  SOUS-ESTIMATION   : ORGILLS ET HOLLANDS
                      (  88.0% ,  76.2% )
                      CONFIRME 6 ANNEES SUR 6

  ERREUR RELATIVE ABSOLUE

   INFERIEUR A 10% : (  34.1% ,  51.2% )
               A 20% : (  49.0% ,  67.5% )
               A 30% : (  59.6% ,  74.6% )

MODELES     : TRNSYS & WATSUN
MOIS        : FEVRIER                        IHM =  0.40 MJ/(H-M**2)

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

                    SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

  ERREUR RMS        : ORGILLS ET HOLLANDS
                      (  56.6% ,  38.8% )
                      CONFIRME 5 ANNEES SUR 5

  SOUS-ESTIMATION   : ORGILLS ET HOLLANDS
                      (  84.8% ,  71.9% )
                      CONFIRME 5 ANNEES SUR 5

  ERREUR RELATIVE ABSOLUE

   INFERIEUR A 10% : (  40.6% ,  49.0% )
               A 20% : (  56.1% ,  66.8% )
               A 30% : (  62.8% ,  76.3% )

MODELES     : TRNSYS & WATSUN
MOIS        : DECEMBRE                       IHM =  0.25 MJ/(H-M**2)

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

                    SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

  ERREUR RMS        : ORGILLS ET HOLLANDS
                      (  45.6% ,  32.0% )
                      CONFIRME 6 ANNEES SUR 6

  SOUS-ESTIMATION   : ORGILLS ET HOLLANDS
                      (  77.1% ,  60.4% )
                      CONFIRME 6 ANNEES SUR 6

  ERREUR RELATIVE ABSOLUE

   INFERIEUR A 10% : (  47.1% ,  56.9% )
               A 20% : (  63.2% ,  73.7% )
               A 30% : (  71.8% ,  82.8% )
```

Tableau 4.7 - Compilation des résultats pour trois mois d'hiver à Goose Bay (rayonnement diffus).

VILLE : GOOSE BAY
PERIODE : 1973 - 1978
RAYONNEMENT : DIFFUS
MODELES : TRNSYS & WATSUN
MOIS : JANVIER

ANALYSE DES MODELES DE CALCUL DU RAYONNEMENT SOLAIRE

IHM = 0.24 MJ/(H-M**2)

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

ERREUR RMS : CRGILLS ET HOLLANDS
(59.2% , 43.6%)
CONFIRME 6 ANNEES SUR 6

SOUS-ESTIMATION : CRGILLS ET HOLLANDS
(96.0% , 82.5%)
CONFIRME 6 ANNEES SUR 6

ERREUR RELATIVE ABSOLUE

INFERIEUR A 10% : (17.2% , 36.3%)
A 20% : (32.0% , 54.1%)
A 30% : (47.6% , 68.4%)

MODELES : TRNSYS & WATSUN
MOIS : FEVRIER

IHM = 0.36 MJ/(H-M**2)

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

ERREUR RMS : CRGILLS ET HOLLANDS
(39.6% , 41.7%)
CONFIRME 5 ANNEES SUR 5

SOUS-ESTIMATION : CRGILLS ET HOLLANDS
(96.2% , 82.7%)
CONFIRME 6 ANNEES SUR 6

ERREUR RELATIVE ABSOLUE

INFERIEUR A 10% : (27.6% , 42.2%)
A 20% : (40.6% , 61.2%)
A 30% : (53.7% , 71.0%)

MODELES : TRNSYS & WATSUN
MOIS : DECEMBRE

IHM = 0.19 MJ/(H-M**2)

* ENSEMBLE DU MOIS - HORAIRE

SEUIL=0.00 MJ/(H-M**2)

ERREUR RMS : CRGILLS ET HOLLANDS
(46.1% , 29.0%)
CONFIRME 6 ANNEES SUR 6

SOUS-ESTIMATION : CRGILLS ET HOLLANDS
(90.3% , 70.7%)
CONFIRME 6 ANNEES SUR 6

ERREUR RELATIVE ABSOLUE

INFERIEUR A 10% : (28.5% , 46.3%)
A 20% : (43.9% , 68.0%)
A 30% : (57.2% , 81.9%)

4.5 Références

4.1- Orgill J.F. & Hollands K.G.T., 1976. WATSUN User's manual. University of Waterloo, Ont.

4.2- Orgill J.F. et Hollands K.G.T., 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar Energy, 19 : 357-359.

4.3- Klein S.A. et al., 1979. TRNSYS User's manual, Version 10.1 . EES Rpt. 38-10, University of Wisconsin, Madison.

4.4- Liu B.Y.H. et Jordan R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, 4 : 1-19.

4.5- Boes E.C., 1975. Estimating the direct component of solar radiation. Rpt. SAND 75-0565, Sandia Laboratories, Albuquerque.

4.6- McFarland R.D., 1978. PASOLE : A general simulation program for Passive Solar Energy. Rpt. LA-7433-MS, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos.

4.7- Hottel H.C., 1976. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. Solar Energy, 18 : 129-134.

4.8- Bugler J.W., 1977. The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation. Solar Energy, 19 : 477-491.

4.9- Klein S.A., 1977. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. Solar Energy, 19 : 325-329.

4.10- Fanney A.H. et Liu S.T., 1980. Comparison of experimental and computer-predicted performance for six solar domestic hot water systems. ASHRAE Trans., 86 : 823-835.

CHAPITRE 5 - ÉVALUATION DE QUATRE MODÈLES CALCULANT LE RAYONNEMENT MENSUEL À PARTIR DE LA DURÉE D'INSOLATION

5.1 Introduction

Dans le domaine du rayonnement solaire, les recherches consacrées au calcul mensuel de l'irradiation globale au sol sont depuis longtemps à l'honneur pour répondre aux besoins de la climatologie, de l'agro-météorologie ou de l'hydrologie.

Les premiers travaux dans ce secteur remontent en effet au début du siècle. Les premières formulations empiriques suggérant l'utilisation de la durée d'insolation pour estimer le rayonnement global sont attribuées à Kimball (1919) et à Angström (1924).

Les recherches subséquentes sont généralement restées très empiriques. Cependant, l'intérêt récent pour l'utilisation de l'énergie solaire a stimulé la recherche dans ce domaine, notamment en vue d'étendre la validité des modèles, de permettre la séparation des irradiations directes et diffuses, et de calculer l'irradiation totale sur des plans inclinés.

En dehors des applications pratiques dans les domaines précédemment cités, les modèles permettant le calcul du rayonnement incident pour une journée moyenne d'un mois particulier peuvent servir par exemple à estimer le rendement mensuel moyen d'une installation de chauffage solaire, ou sa «fraction solaire» mensuelle. Cependant, les méthodes de design utilisent des valeurs moyennes mensuelles «à long terme» plutôt que ces valeurs particulières.

La distinction entre ces deux types de valeurs a été évoquée au chapitre 2. Le calcul de valeurs mensuelles particulières de rayonnement correspond à la classe B22 de la grille, alors que le calcul des valeurs moyennes mensuelles à long terme correspond à la classe B23. Ce dernier type de calcul est décrit au chapitre 6.

Du fait de la grande similitude des deux approches, il a cependant été décidé d'évaluer si la précision des estimations obtenues par un modèle étaient affectées par cette différence entre valeurs particulières et valeurs à long terme. Par exemple, deux modèles de la classe B22 ont été évalués par rapport à des valeurs à long terme (voir chapitre 6) et un modèle de la classe B23 a été évalué par rapport à des valeurs particulières, dans ce chapitre.

Parmi tous les modèles disponibles en vue de cette étude, le choix s'est porté uniquement sur des modèles récents. Deux d'entre eux ont été mis au point à partir de données provenant de stations de l'est du Canada (Gariépy [5.1] et Iqbal [5.2]), un autre a été mis au point à partir de données provenant de stations canadiennes plus occidentales (Hay [5.3]). Enfin, un quatrième modèle (Rietveld [5.4])

a été choisi d'une part parce qu'il tient compte de données provenant de stations situées dans des pays très différents (donc susceptible d'une validité étendue), et aussi parce que les résultats obtenus pour certaines stations canadiennes par Davies [5.5] semblaient encourageants.

5.2 Description des modèles

Les quatre modèles analysés ici reprennent le principe de base de Page [5.6], lui-même inspiré des travaux pionniers de Kimball [5.7] et Angström [5.8]. Dans cette approche, l'irradiation mensuelle moyenne (H), que l'on cherche, est exprimée sous forme d'un rapport adimensionnel (H/H_o, où H_o est l'irradiation extraterrestre pour la même période en fonction linéaire de la fraction d'insolation n/N_o:

$$H/H_o = a+b\ n/N_o \qquad (5.1)$$

où a et b sont deux coefficients obtenus par régression linéaire. De nombreux auteurs ont donné des valeurs des coefficients a et b pour de nombreux climats (voir par exemple le travail de récapitulation de Löf et al [5.9]).

L'inconvénient de cette méthode repose précisément sur le fait que les coefficients a et b sont très variables et dépendants du climat; ils doivent donc être calculés pour chaque région climatique à partir de données mesurées, ce qui limite considérablement leur applicabilité.

L'intérêt de trois des quatre modèles testés dans ce chapitre réside surtout dans le fait que les coefficients a et b ne sont plus considérés comme constants, mais comme dépendant de facteurs climatiques couramment mesurés. La question est évidemment de savoir si cette modélisation permet de rendre compte totalement des variations observées pour a et b suivant les climats. Pour exprimer cette question de manière plus pratique, on peut se demander par exemple si les modèles de Hay et Rietveld sont suffisamment flexibles pour permettre d'obtenir de bonnes estimations au Québec, donc dans des conditions climatiques différentes de celles qui caractérisent les stations dont les données ont été utilisées pour leur mise au point.

5.2.1 Calculs préliminaires

Tous les modèles décrits dans ce chapitre utilisent les valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation extraterrestre (H_o) sur un plan horizontal. H_o est fonction de l'irradiance extraterrestre I_{on}, de la latitude ϕ, de la déclinaison δ et de l'angle horaire au lever ω_o:

$$H_o = 2\ I_{on} \cos\phi \cos\delta\ (\sin\omega_o - \omega_o \cos\omega_o)/15 \qquad (5.2)$$

où les valeurs moyennes mensuelles à utiliser pour I_{on} et δ sont données au tableau 5.1, et où ω_o (en radians dans la formule 5.2) est calculé par:

$$\omega_o = \text{Arc cos}\ (-\tan\phi \tan\delta) \qquad (5.3)$$

TABLEAU 5.1 - Valeurs moyennes mensuelles de la déclinaison δ et de l'irradiance extraterrestre I_{on}

Mois	δ (deg.)	I_{on} (W m^{-2})	I_{on} (MJ $hr^{-1}m^{-2}$)
1	-20.9	1396	5.026
2	-12.9	1387	4.993
3	-2.0	1369	4.928
4	9.6	1346	4.846
5	18.7	1325	4.770
6	23.0	1313	4.727
7	21.2	1310	4.716
8	13.8	1320	4.752
9	2.9	1339	4.820
10	-8.7	1362	4.903
11	-18.4	1383	4.979
12	-23.0	1395	5.022

TABLEAU 5.2 - Valeurs mensuelles de l'albédo régional moyen, ρ_r pour les stations considérées, d'après les données de Paulin [5.11]

Mois / Station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Montréal, Ottawa, Fredericton	0.33	0.40	0.32	0.23	0.15	0.14	0.14	0.14	0.16	0.18	0.20	0.27
Toronto	0.29	0.34	0.28	0.21	0.15	0.14	0.14	0.14	0.16	0.17	0.19	0.24
Goose Bay	0.45	0.46	0.43	0.39	0.35	0.28	0.21	0.14	0.23	0.33	0.41	0.43
Normandin	0.39	0.43	0.37	0.31	0.25	0.21	0.17	0.14	0.20	0.26	0.31	0.35
Sept-Iles	0.41	0.44	0.39	0.34	0.29	0.23	0.18	0.14	0.21	0.28	0.35	0.37
Moosonee	0.43	0.45	0.41	0.37	0.32	0.25	0.19	0.14	0.22	0.30	0.38	0.40

La durée du jour N_o, se calcule par:

$$N_o = \omega_s / 7.5 \qquad (5.4)$$

où ω_s est en degrés et N_o en heures.

La durée pendant laquelle le soleil a une hauteur supérieure à 5 degrés est donné par:

$$N_5 = \{ \text{Arc cos} [\frac{\sin 5°}{\cos\phi \cos\delta} - \tan\phi \tan\delta] \}/7.5 \qquad (5.5)$$

On définira les «fractions d'insolation» par:

$$\sigma = n/N_o \qquad (5.6)$$

$$\sigma' = n/N_5 \qquad (5.7)$$

où n est la durée d'insolation pour un jour moyen du mois considéré (en heures).

On définira aussi des «fractions d'irradiation» globale, directe et diffuse respectivement par:

$$K_T = H/H_o, \quad K_b = H_b/H_o \quad \text{et} \quad K_d = H_d/H_o \qquad (5.8)$$

avec $H = H_b + H_d$ donc: $K_T = K_b + K_d$ (5.9)

5.2.2 Modèle de Gariépy

Établi à partir des données journalières des six stations mesurant le rayonnement global au Québec, et des données d'insolation correspondantes, le modèle de Gariépy [5.1] repose sur une relation linéaire entre K_T et σ, avec des coefficients qui sont eux-mêmes fonction de la température ($\bar{T}a$) et de la précipitation totale ($\bar{P}$), évaluées en moyenne à long terme pour le mois. Les paramètres climatologiques sont aisément disponibles dans plusieurs publications (voir par exemple [5.10]).

L'interaction de ces deux paramètres doit permettre de rendre compte des variations de la transmission des nuages et de l'atmosphère, et en principe aussi des effets de rétrodiffusion entre le sol et le ciel.

Connaissant σ, K_T est calculé par:

$$K_T = A + B\,\sigma \qquad (5.10)$$

où A et B sont déterminés par:

$$A = 0.45274 - 0.0023\,\bar{T}a - 0.04475\,\bar{P} \qquad (5.11)$$

$$B = 0.40485 + 0.00238\,\bar{T}a + 0.02463\,\bar{P} \qquad (5.12)$$

où $\bar{T}a$ est exprimé en degrés Fahrenheit et $\bar{P}$ en pouces.

Pour se conformer à l'usage d'unités dérivées du Système International ($\bar{T}a$ en °C et $\bar{P}$ en cm), l'expression des coefficients a été modifiée comme suit:

$$A = 0.3791 - 0.0041\,\bar{T}a - 0.0176\,\bar{P} \qquad (5.13)$$

$$B = 0.4810 + 0.0043\,\bar{T}a + 0.0097\,\bar{P} \qquad (5.14)$$

Ce modèle ne fournit pas la possibilité de connaître séparément les irradiations directe et diffuse (H_b et H_d). L'adjonction de formules de séparation provenant d'autres modèles est donc nécessaire.

5.2.3 Modèle de Hay

Ce modèle a été développé à partir de données provenant de stations situées dans l'ouest et le nord-ouest canadien, et fournit des valeurs mensuelles particulières de l'irradiation globale et diffuse. Il offre également une méthode originale pour le calcul de l'irradiation sur les plans inclinés, mais cette étude ne sera pas abordée ici. Dans ce modèle, Hay [5.3] tient compte de la rétrodiffusion entre le sol et le ciel, ainsi que du seuil de sensibilité des héliographes mesurant la durée d'insolation. D'où l'intervention de l'albédo du sol, ρ_r, évalué sur une base régionale moyenne (ce qui le distingue nettement de l'albédo local au voisinage d'un capteur solaire par exemple), et de la fraction d'insolation corrigée, σ'.

Des nouvelles grandeurs doivent être introduites pour corriger les irradiations H et H_d en tenant compte de la rétrodiffusion. On conviendra donc que H' et H'_d représenteront respectivement les irradiations globale et diffuse avant rétrodiffusion et que H_{rd} représentera l'irradiation de nature diffuse qui provient des effets de rétrodiffusion. Dans ces conditions, on a $H = H' + H_{rd}$ et $H_d = H'_d + H_{rd}$. Par analogie avec les notations adoptées au paragraphe 5.2.1, équation (5.8), on posera:

$$K'_T = H'/H \quad \text{et} \quad K'' = H'_d/H' \tag{5.15}$$

On peut montrer alors que l'algorithme permettant le calcul de H et H_d peut être présenté sous une forme nettement plus simple que dans l'article original de Hay [5.3]:

$$K'_T = 0.1572 + 0.5566\,\sigma' \tag{5.16}$$

$$K_r = \rho_r\,(0.6989 - 0.6288\,K'_T) \tag{5.17}$$

$$K_T = K'_T/(1-K_r) \tag{5.18}$$

$$K'' = 0.9702 + 1.6688\,K'_T - 21.303K'^2_T + 51.288\,K'^3_T - 50.081\,K'^4_T + 17.551\,K'^5_T \tag{5.19}$$

$$K_d = K'_T K'' + K_r K_T \tag{5.20}$$

$$K_b = K_T - K_d \tag{5.21}$$

Pour opérer le modèle, il ne reste donc plus qu'à pouvoir évaluer ρ_r pour chaque mois, ce qui peut se faire en interpolant les valeurs que Paulin [5.11] a fournies pour l'Amérique du Nord par pas de 5° entre 40 et 60° de latitude. Les valeurs mensuelles ainsi obtenues pour chacune des huit stations étudiées apparaissent au tableau 5.2.

5.2.4 Modèle d'Iqbal

En utilisant les données de trois stations canadiennes (Montréal, Toronto et Goose Bay), Iqbal [5.2] a proposé une série de relations statistiques permettant de calculer les composantes diffuse, directe et globale de l'irradiation à long terme sur une surface horizontale, à partir de la fraction d'insolation $\bar{\sigma}$.

Ce modèle de la classe B23 sera étudié dans ce chapitre comme s'il était de la classe B22. Cet essai est motivé par le fait qu'il utilise des données de Montréal, et que sa formulation est particulièrement simple puisque les fractions d'irradiation K_T, K_b et K_d (voir formule (5.8)) sont obtenues par des fonctions linéaires ou quadratiques de σ. Cependant, différentes corrélations statistiques ont été proposées par Iqbal suivant les stations étudiées. Or, la présente étude met l'accent sur la recherche d'une formulation unique pour tout le Québec, sans distinction des particularités climatiques régionales. Ainsi, seules les formules préconisées par Iqbal dans sa conclusion (et obtenues en combinant les données des trois stations précitées) ont été considérées ici.

Le calcul de K_T n'étant pas donné explicitement par Iqbal, on a considéré ici la relation quadratique obtenue par combinaison de ses formules de base, et qui fournit de meilleurs résultats qu'une formule linéaire pour des valeurs moyennes à long terme, tel qu'il ressort du chapitre 6:

$$K_T = -0.013 + 1.928\sigma - 1.775\sigma^2 \qquad (5.22)$$

Le calcul de l'irradiation diffuse peut se faire de plusieurs manières. On a retenu l'approche qui semble la plus intéressante en moyenne long terme (d'après le chapitre 6):

$$K_d = (0.791 - 0.635\sigma)\, K_T \qquad (5.23)$$

Les valeurs d'irradiation directe s'obtiennent alors facilement par:

$$K_b = K_T - K_d \qquad (5.24)$$

5.2.6 Modèle de Rietveld

Utilisant les données de 42 stations du monde entier (dont 9 en Yougoslavie, 6 en Suède, 5 en Belgique, 9 aux États-Unis, mais aucune au Canada), Rietveld [5.4] a montré que les coefficients de la relation Kimball-Angström-Page (5.10) pouvaient être considérés comme des fonctions de la fraction d'insolation moyenne annuelle $\bar{\sigma}$, qui s'obtient simplement en faisant la moyenne des 12 valeurs mensuelles de $\bar{\sigma}$, valeurs elles-mêmes obtenues en calculant la moyenne à long terme des valeurs de σ (voir chapitre 6).

Le modèle peut alors s'écrire:

$$K_T = A + B\,\sigma \qquad (5.25)$$

avec

$$A = 0.10 + 0.24\,\bar{\sigma} \qquad (5.26)$$

$$B = 0.38 + (0.08/\bar{\sigma}) \qquad (5.27)$$

Ce modèle a déjà été évalué par Davies [5.5] pour six stations canadiennes. Bien que les résultats aient été qualifiés de bons par cet auteur, il faut remarquer que Davies a d'une part utilisé ce modèle avec des valeurs journalières particulières au lieu de valeurs moyennes mensuelles, et a d'autre part considéré que σ et $\bar{\sigma}$ étaient tous deux égaux à σ', ce qui a ramené en fait ce modèle à une formule de type Kimball-Angström-Page. D'où, selon l'interprétation de Davies:

$$K_T = 0.18 + 0.62\ \sigma' \qquad (5.28)$$

Ainsi, les résultats obtenus par Davies perdent leur signification dans l'optique du présent chapitre, ce qui entraîne l'intérêt d'une nouvelle étude, basée cette fois-ci sur les formules (5.25) à (5.27).

5.2.6 Modèle complémentaire de Gueymard et al.

Comme complément aux quatre modèles de base précédemment décrits, il a été jugé utile d'y adjoindre une méthode indépendante pour le calcul de K_b et K_d. En effet, dans presque toutes les applications de l'énergie solaire, il est nécessaire d'évaluer séparément les composantes directe et diffuse sur l'horizontale, pour pouvoir ensuite les évaluer sur un plan incliné, évaluer le facteur de transmission des vitrages, etc. Or, parmi les quatre modèles retenus pour le calcul de K_T, seuls ceux de Hay et Iqbal permettent également d'évaluer K_b et K_d. Encore faut-il remarquer que les relations statistiques proposées par ces deux auteurs (équations 5.19, 5.20 et 5.23) ne sont pas basées sur des données mensuelles particulières, mais respectivement sur des données horaires moyennes à long terme et des données mensuelles moyennes à long terme.

Aussi, la corrélation proposée par Gueymard et al. [5.12, 5.13] pour estimer les valeurs de K_b en fonction de la durée d'insolation a-t-elle été essayée en complément des quatre modèles de base. Pour des moyennes décadaires particulières (c'est-à-dire des périodes de 10 jours consécutifs en principe, mais en pratique de 8 à 11 jours suivant les mois), une relation quadratique et une relation linéaire avaient été proposées à partir de données de Montréal:

$$K_b = 0.492\ \sigma' + 0.023\ \sigma'^2 \qquad (5.29)$$

$$K_b = 0.505\ \sigma' \qquad (5.30)$$

Ces relations expliquant aussi bien les variations de K_b l'une que l'autre (le coefficient de corrélation est $r = 0.936$ dans les deux cas), la relation (5.30) a été jugée plus intéressante. D'autre part, des recherches subséquentes des mêmes auteurs (non publiées) ont montré que cette relation était encore valable à Goose Bay, malgré un climat très différent de celui de Montréal. On peut donc présumer qu'elle reste valable pour une grande partie au moins du Québec. Cependant, étant utilisée ici avec des moyennes mensuelles plutôt que décadaires, il est possible que le calcul de K_b en souffre comme dans le cas des modèles de Hay et Iqbal.

Connaissant K_b, l'irradiation diffuse est calculée au moyen de:

$$K_d = K_T - K_b \qquad (5.31)$$

5.3 Méthode d'évaluation

Les résultats fournis par les modèles décrits ci-dessus sont comparés aux données de rayonnement mesuré, après compilation des données d'insolation et de rayonnement sous forme de moyennes mensuelles particulières. Les données de base sont tirées de publications périodiques d'Environnement Canada [5.14], [5.15].

Trois stations du Québec méridional (Montréal, Normandin et Sept-Iles), ainsi que cinq stations limitrophes (Toronto, Ottawa, Moosonee, Goose Bay, Fredericton) ont été choisies de manière à obtenir un échantillonnage climatique suffisant et pouvoir tirer des conclusions valables pour la plus grande partie du Québec au moins.

La position géographique de ces stations a déjà été indiquée au tableaux 1.1 et 1.2. Les stations de mesure du rayonnement les plus récentes ayant été mises en service en 1973 (tableau 1.1), la période d'étude choisie a été 1973-1980, soit 96 mois pour chaque station. On rappelle que trois stations seulement mesurent le rayonnement diffus. Compte tenu des mois où les données sont manquantes, les comparaisons entre valeurs calculées et mesurées ont porté sur un total de 691 points pour le rayonnement global (soit 90% de données utilisables), 266 points pour le rayonnement diffus (92% de données utilisables pour les trois stations concernées), et 253 points pour le rayonnement direct (88% de données utilisables).

On remarquera que les données choisies pour les tests ne sont pas complètement indépendantes des données utilisées par Gariépy et Iqbal pour la mise au point statistique de leur modèle, ce qui aurait tendance à les favoriser.

La présente étude se voulant pratique et orientée vers l'utilisateur potentiel de méthodes simples, aucune tentative n'a été faite pour ajuster les données. On notera ainsi que l'insolation et le rayonnement ne sont pas mesurés au même endroit à Ottawa et que les masques naturels de l'horizon ne sont pas pris en compte bien que leur influence puisse être non négligeable suivant la topographie locale [5.16]. On se place ainsi dans la position de l'utilisateur qui veut connaître le risque d'erreur introduit par le calcul du rayonnement incident, à partir des données disponibles, et qui veut pouvoir choisir le meilleur modèle pour une région particulière.

Tous les résultats ont été comparés mois par mois aux valeurs mesurées correspondantes. Pour chaque modèle et chaque station, on a résumé les erreurs d'estimation au moyen de deux paramètres statistiques: l'erreur moyenne de tendance (EMT) et l'erreur quadratique (RMS), calculées sur les 12 valeurs mensuelles obtenues dans chaque cas puis normalisées en les rapportant aux valeurs moyennes de H, H_d ou H_b:

$$RMS = \frac{1}{\bar{H}}\sqrt{\sum_{i=1}^{N} e_i^2 / N} \quad , \quad EMT = \frac{1}{\bar{H}}\left(\sum_{i=1}^{N} e_i / N\right) \qquad (5.32)$$

où e_i est l'erreur individuelle (en valeur mensuelle). L'erreur RMS a été

jugée le critère prépondérant. Une inspection détaillée des résultats a également été effectuée dans le but de déceler d'éventuelles tendances particulières (saisonnières ou latitudinales par exemple). De plus, les erreurs relatives mensuelles ont été réparties par classe de 10%. Des erreurs comprises entre -10 et 10% ont été jugées «acceptables», alors que des erreurs inférieures à -20% ou supérieures à +20% ont été jugées «inacceptables».

Pour le calcul du diffus et du direct, chacun des quatre modèles testés a été combiné avec d'une part la relation (5.23) tirée d'Iqbal et la relation (5.30) de Gueymard et al. On notera qu'il en résulte trois (et non deux) méthodes différentes possibles pour ce calcul de K_b et K_d dans le cas du modèle de Hay, puisqu'il est déjà pourvu de sa propre méthode.

5.4 Résultats et discussion

5.4.1 Rayonnement global

Les résultats annuels de l'erreur RMS pour Montréal, Toronto et Goose Bay sont représentés à la figure 5.1. On remarque que les modèles de Gariépy et Hay ont une précision sensiblement constante et parallèle à Montréal et Toronto. Le modèle de Rietveld se comporte également très bien, alors que le modèle d'Iqbal a des résultats nettement moins bons. À Goose Bay, les modèles de Gariépy et Hay sont encore bons et sensiblement équivalents, mais nettement moins constants. Des «accidents» marquent en effet les années 1974 et 1978 pour tous les modèles à cette station, ce qui peut s'expliquer par des variations climatiques importantes ou par des problèmes de mesure.

On retrouve sensiblement les mêmes observations aux cinq autres stations, avec des «accidents» à Frédéricton en 1973 et à Moosonee en 1979.

Les erreurs RMS et EMT ont été calculées en moyenne pour toute la période 1973-1980 et exprimées en pourcentage de H. Ces résultats apparaissent au tableau 5.3. Ils confirment la très bonne performance d'ensemble des modèles de Gariépy et Hay. Par contre, le modèle d'Iqbal est systématiquement à l'origine d'erreurs importantes, ce qui peut éventuellement s'expliquer par le fait qu'il n'est pas prévu pour des valeurs mensuelles particulières et qu'il a une approche plus simple que les autres modèles.

Les histogrammes des erreurs mensuelles relatives font l'objet des figures 5.2 à 5.4. La répartition des erreurs est satisfaisante et d'allure gaussienne pour les modèles de Gariépy et Hay. La distribution est nettement plus étalée pour le modèle de Rietveld.

Ce dernier modèle, comme indiqué en 5.2.5 a déjà été investigué par Davies [5.5] sur la base de la formule (5.28). Il est particulièrement intéressant de mettre en concordance les résultats d'ensemble (tableau 5.4) obtenus dans ces deux analyses différentes pour les stations de Montréal, Toronto et Goose Bay. Bien que la période étudiée par Davies soit légèrement différente (1968-1978) de celle adoptée ici on remarquera

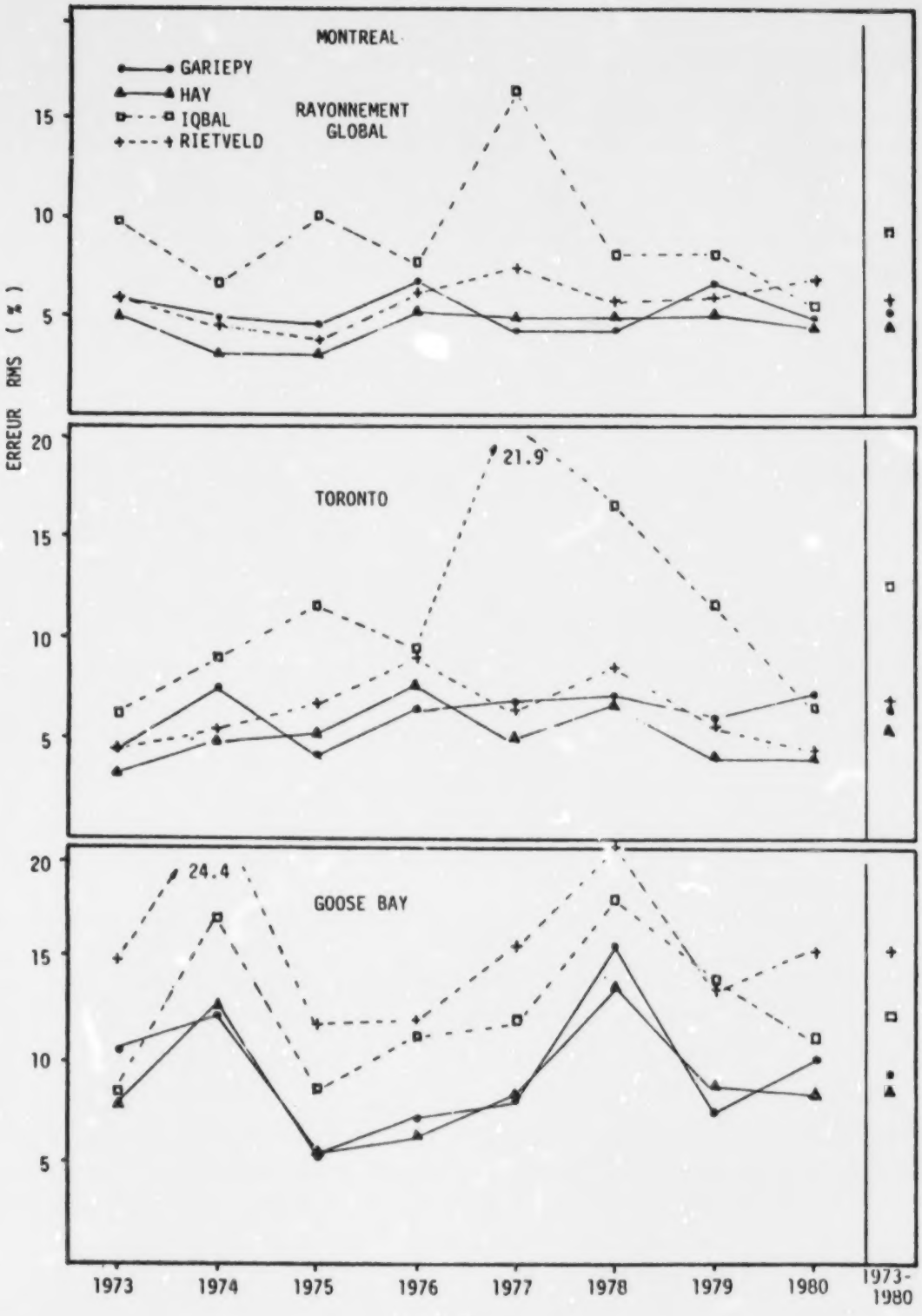


Figure 5.1 - Compilation des erreurs RMS annuelles pour le rayonnement global.

TABLEAU 5.3 - Récapitulation des résultats pour le rayonnement global

Station	H mesuré moyen	N	GARIÉPY RMS(%)	GARIÉPY EMT(%)	HAY RMS(%)	HAY EMT(%)	IQBAL RMS(%)	IQBAL EMT(%)	RIETVELD RMS(%)	RIETVELD EMT(%)
Montréal	12.31	86	5.3	+0.0	4.6	-0.6	9.4	+0.2	6.0	-2.4
Toronto	13.32	94	6.4	+4.2	5.4	-0.0	12.6	-3.6	6.7	-1.8
Goose Bay	10.32	85	9.6	-4.4	8.8	-2.4	12.4	-3.3	15.8	-11.0
Ottawa	12.39	88	6.2	+3.4	5.4	+1.2	9.9	-0.8	7.3	+1.4
Fredericton	12.19	94	6.9	-1.8	6.8	+0.0	9.0	+3.1	7.8	-2.4
Normandin	12.48	84	8.6	-5.1	9.9	-7.0	13.6	-7.7	15.1	-11.8
Sept-Iles	11.19	85	6.1	-1.9	6.1	+2.2	9.2	+0.6	8.2	-3.9
Moosonee	11.61	75	8.6	+3.6	9.4	+3.7	11.4	+1.3	11.5	-3.4
Moyenne	12.00	691	7.2	-0.1	7.1	-0.4	11.1	-1.3	10.1	-4.5

Tableau 5.4 - Comparaison entre les résultats de Davies [5.5] et la présente étude pour le modèle de Rietveld

		Montréal	Toronto	Goose Bay
Eq.(5.28) Résultats de Davies [5.5] Période 1968-1978	RMS (%)	15.6	15.0	18.4
	EMT (%)	+7.3	+2.8	-3.9
	H mesuré moyen (MJ m^{-2})	12.15	13.38	10.54
Eqs.(5.25)-(5.27) Présente étude Période 1973-1980	RMS (%)	6.0	6.7	15.8
	EMT (%)	-2.4	-1.8	-11.0
	H mesuré moyen (MJ m^{-2})	12.31	13.32	10.32

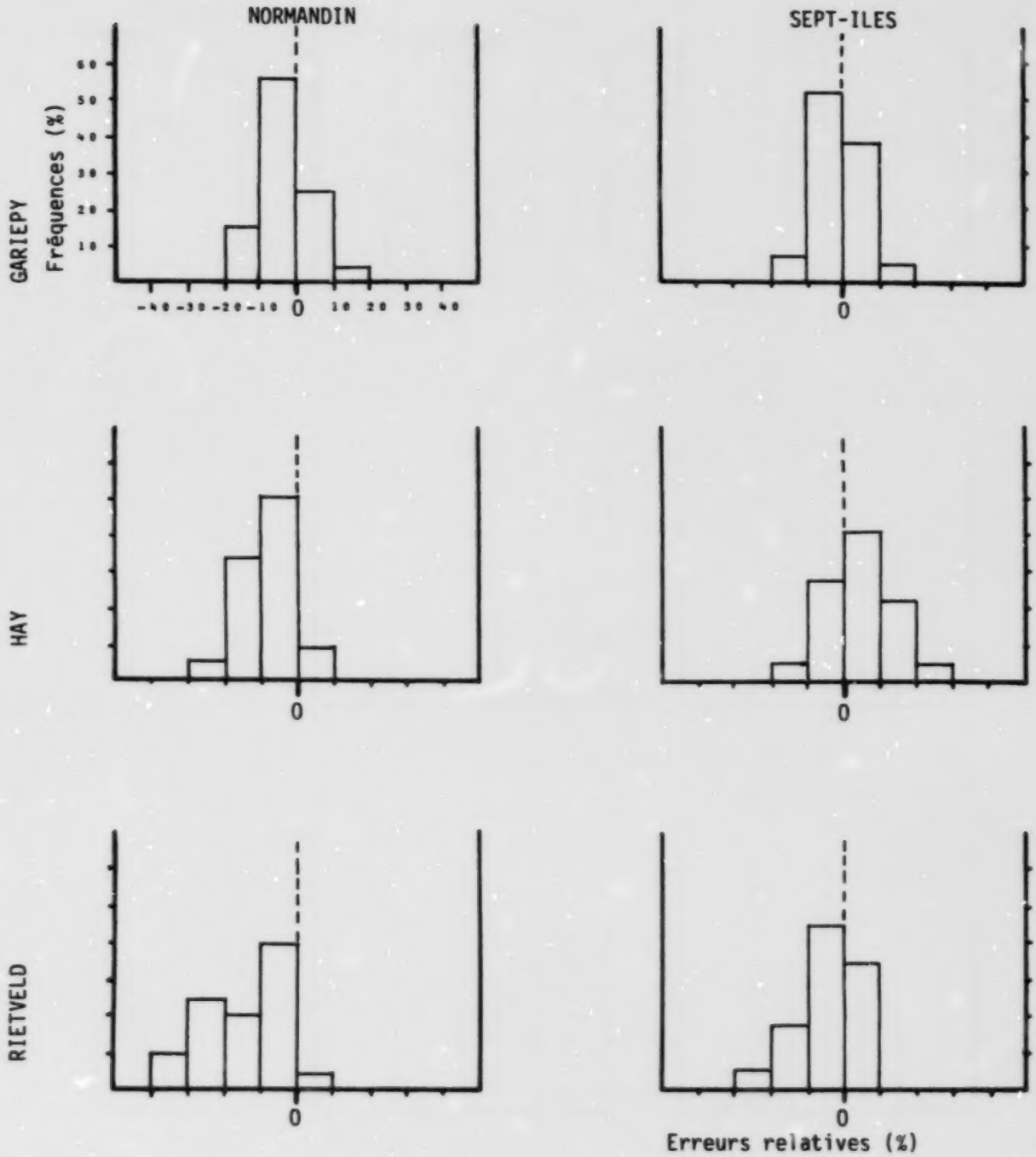


Figure 5.2 - Histogrammes des erreurs relatives pour le rayonnement global.

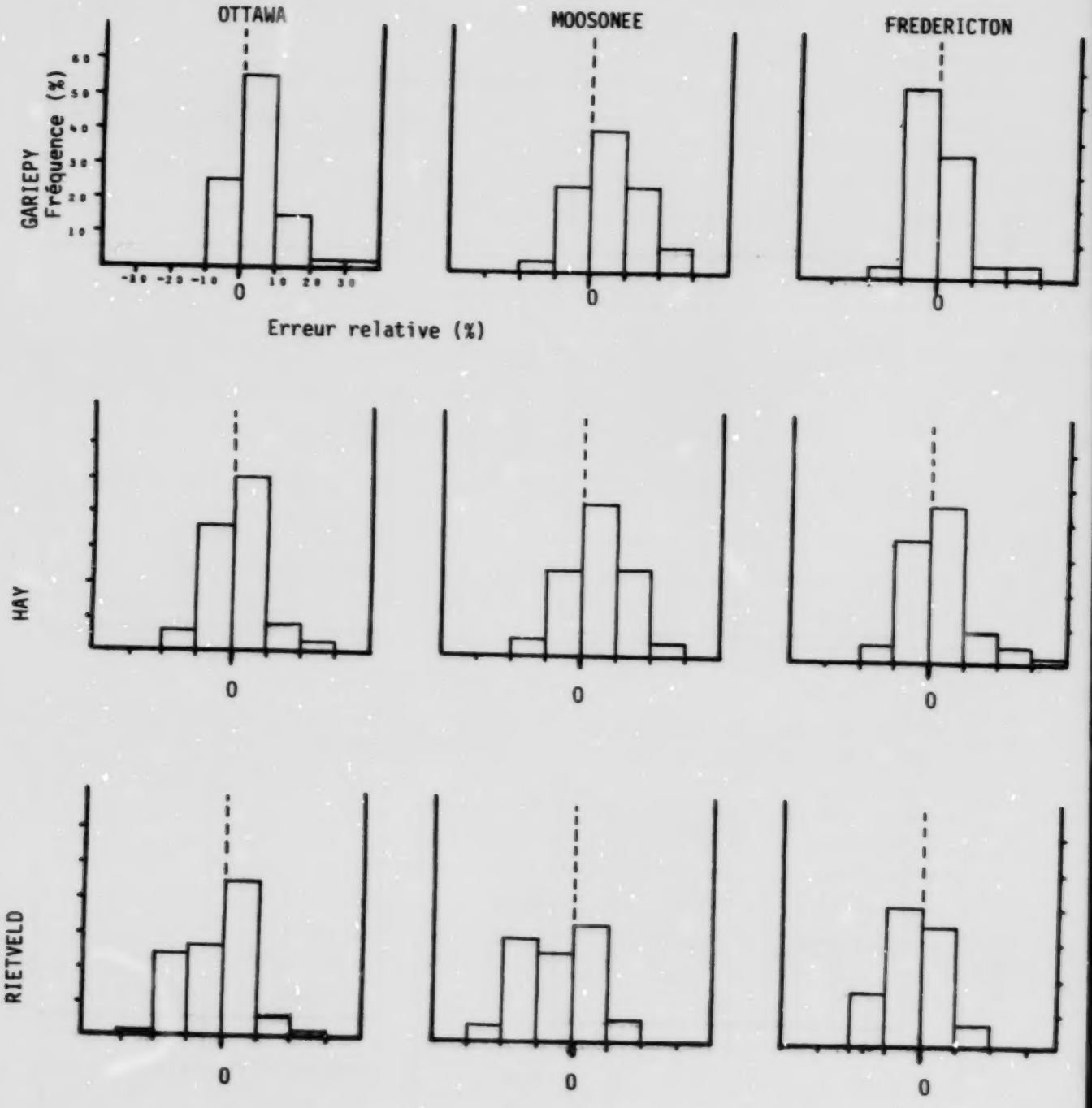


Figure 5.3 - Histogrammes des erreurs relatives pour le rayonnement global (suite).

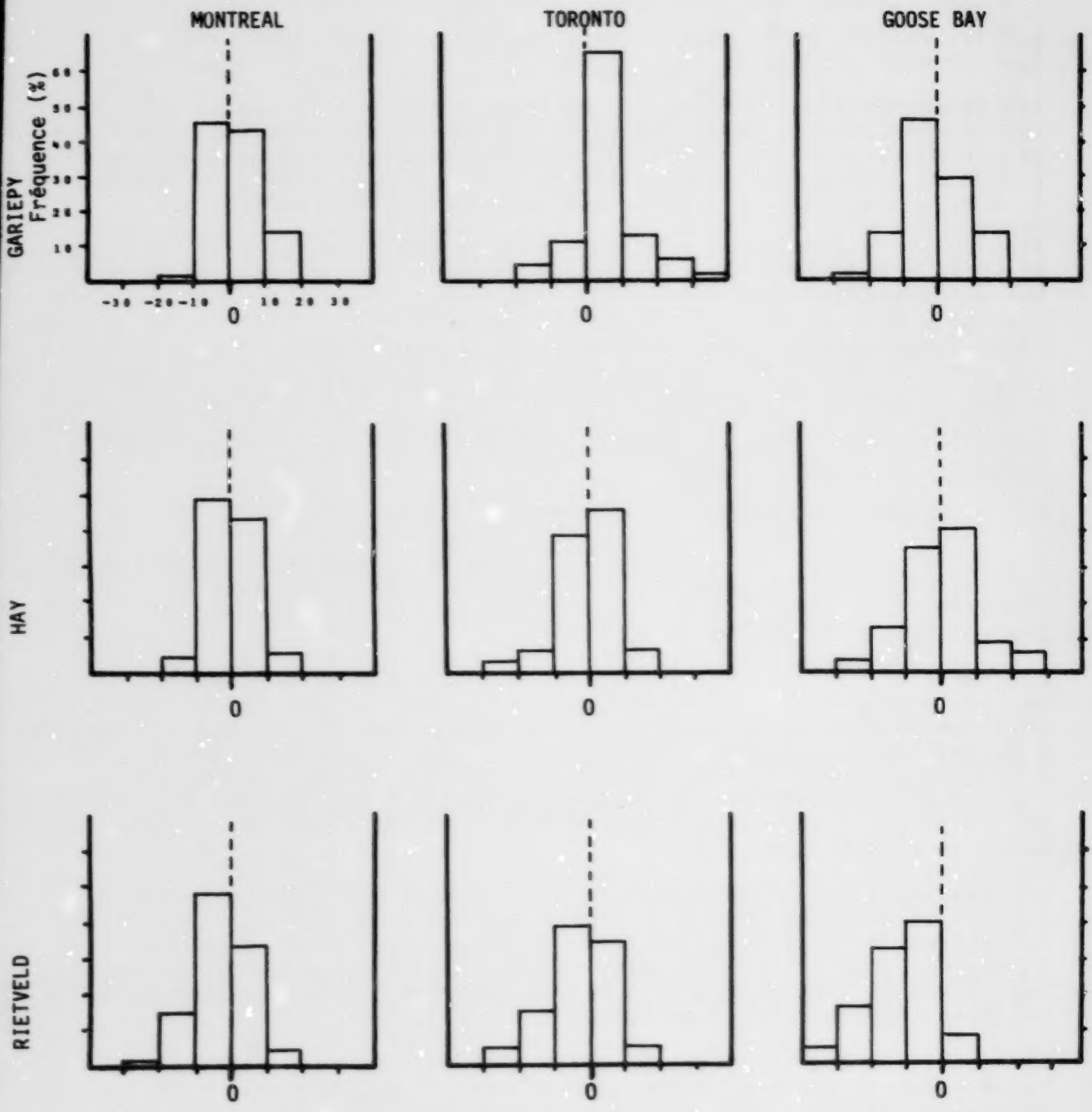


Figure 5.4 - Histogrammes des erreurs relatives pour le rayonnement global (suite).

que les valeurs de l'irradiation globale mesurée moyenne sont sensiblement identiques.

Les interprétations différentes du même modèle entraînent une modification considérable de la précision d'ensemble des résultats. Dans le cas de Montréal et Toronto, les erreurs RMS obtenues avec l'interprétation de Davies sont respectivement 2.6 et 2.2 fois plus fortes qu'avec la nôtre. La tendance moyenne est également très différente.

Bien que le cas de Goose Bay soit moins probant, ce qui n'est peut-être pas étranger aux «accidents» relevés précédemment, il devient évident que «l'interprétation» d'un modèle dont les notations ne sont pas très claires ou dont la classification est inconnue peut entraîner des erreurs importantes. Il est cependant impossible de déterminer à partir des résultats à notre disposition si les variations observées dans la précision du modèle de Rietveld proviennent surtout de la différence entre les équations (5.25) à (5.27) et l'équation (5.28), ou bien surtout de son utilisation avec des valeurs mensuelles plutôt que journalières.

5.4.2 Rayonnement diffus et rayonnement direct

Les quatre modèles de base pour le calcul du rayonnement global ont été combinés chacun avec le modèle d'Iqbal (éq. 5.23,5.24) pour le calcul du diffus puis du direct et celui de Gueymard et al. (éq. 5.30, 5.31) pour le calcul du direct et du diffus.

Les résultats ainsi calculés ont été comparés aux données tirées des mesures à Montréal, Toronto et Goose Bay. Les erreurs RMS et EMT moyennes pour toute la période 1973-1980 et pour chacune des combinaisons étudiées sont portées aux tableaux 5.5 et 5.6. On notera que pour le modèle de Gueymard et al., le calcul de l'irradiation directe est indépendant de la valeur du rayonnement global, à l'inverse des modèles de Hay et Iqbal, ce qui explique l'identité des résultats aux colonnes 2,4,7 et 9 du tableau 5.6.

Les résultats des tableaux 5.5 et 5.6 viennent confirmer ceux obtenus pour le rayonnement global, à savoir que les modèles de Gariépy et Hay obtiennent les meilleurs résultats de façon consistante. Cependant la méthode proposée par Hay pour séparer le diffus et le direct donne des résultats très décevants. Les distributions d'erreurs mensuelles relatives apparaissent aux figures 5.5 à 5.7.

L'ensemble de ces résultats montrent nettement que les combinaisons Gariépy/Iqbal, Gariépy/Gueymard, Hay/Iqbal et Hay/Gueymard sont les plus intéressantes. Les autres ne seront donc plus considérés dans la suite.

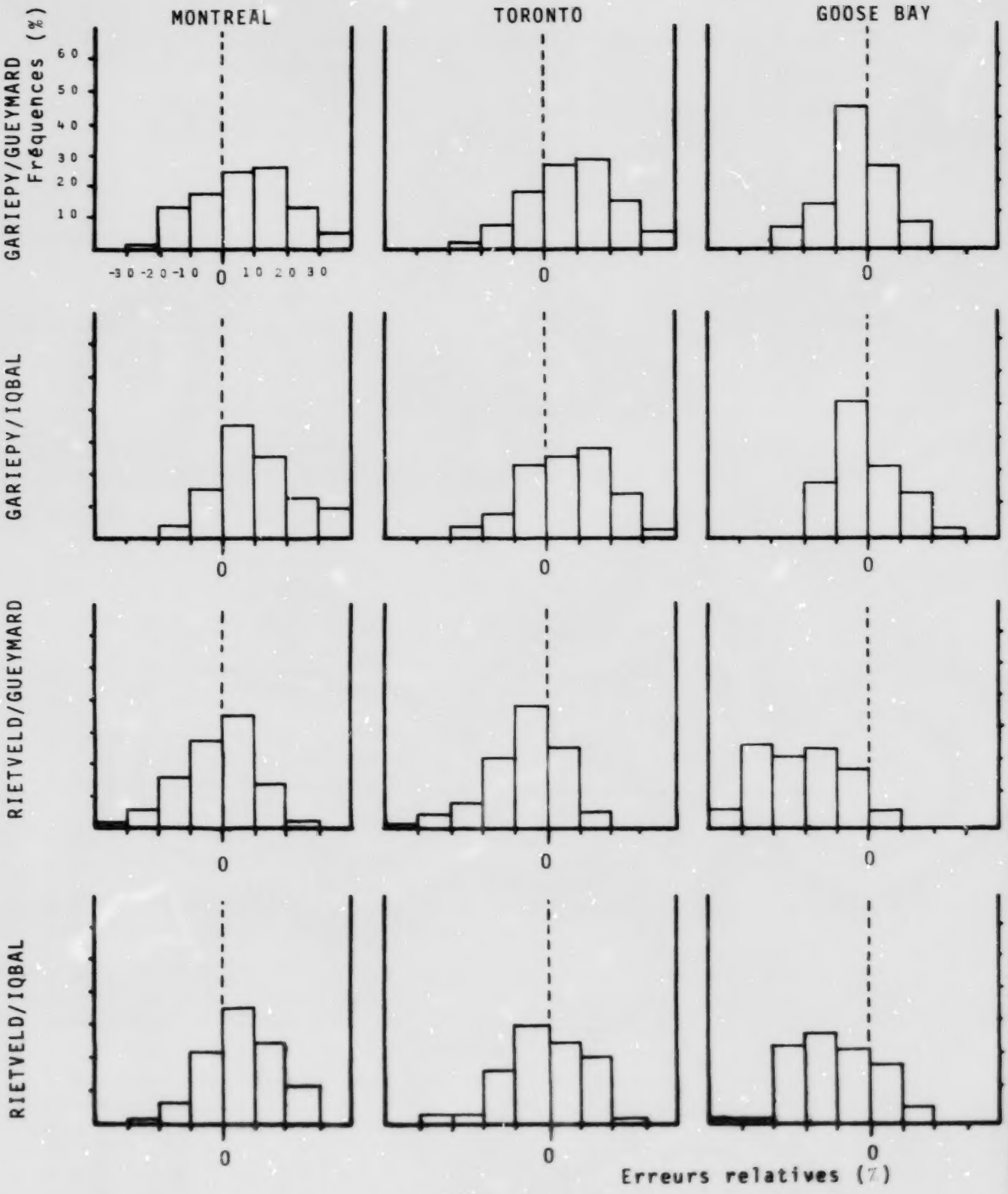
L'évolution des erreurs RMS annuelles entre 1973 et 1980 est montrée aux figures 5.8 et 5.9 pour ces quatre combinaisons. Le regroupement des valeurs montre une bonne homogénéité des résultats, sauf à Goose Bay pour l'irradiation directe. On peut également noter de petits «accidents» à Montréal en 1973 et 1978 pour le diffus et à Goose Bay en 1973 et 1974 pour le direct, pouvant indiquer d'importantes variations climatiques ou/et un manque de précision au niveau des mesures.

TABLEAU 5.5 - Résultats obtenus avec les différentes combinaisons pour le calcul du rayonnement diffus — Erreurs RMS et EMT en % de H_d mesuré moyen

Calcul du global		GARIÉPY		HAY			IQBAL		RIETVELD	
Calcul du diffus	H_d mesuré moyen	IQBAL	GUEYMARD	IQBAL	GUEYMARD	HAY	IQBAL	GUEYMARD	IQBAL	GUEYMARD
Montréal	5.62	13.8[+8.6]	14.9[+4.3]	12.4[+7.7]	11.1[+2.9]	16.1[-7.6]	15.9[+8.6]	19.2[+3.7]	11.2[+5.4]	9.5[-1.4]
Toronto	6.22	12.3[+4.2]	13.6[+5.7]	11.1[-0.4]	11.7[-3.3]	20.8[+15.0]	17.1[-2.8]	30.2[+11.2]	11.5[-2.1]	13.1[-6.9]
Goose Bay	5.60	10.0[-1.6]	13.8[-5.2]	12.1[-0.2]	11.7[-2.2]	14.0[-7.6]	16.0[-1.2]	17.2[-4.0]	16.7[-8.9]	22.7[+17.9]
Moyenne	5.82	12.2[+3.8]	14.2[+1.9]	11.8[+2.3]	11.5[-0.9]	17.6[+10.3]	16.4[+1.4]	23.7[-4.2]	13.2[-1.8]	15.8[-8.5]

TABLEAU 5.6 - Résultats obtenus avec les différentes combinaisons pour le calcul du rayonnement direct — Erreurs RMS et EMT en % de H_b mesuré moyen

Calcul du global		GARIÉPY		HAY			IQBAL		RIETVELD	
Calcul du direct	H_b mesuré moyen	IQBAL	GUEYMARD	IQBAL	GUEYMARD	HAY	IQBAL	GUEYMARD	IQBAL	GUEYMARD
Montréal	6.68	11.7[-7.0]	10.5[-3.2]	12.1[-7.3]	10.5[-3.2]	13.2[+5.5]	14.2[-7.3]	10.5[-3.2]	13.8[-8.9]	10.5[-3.2]
Toronto	7.23	11.8[+4.2]	11.6[+3.0]	11.6[+0.5]	11.6[+3.0]	20.5[+13.0]	14.8[-4.3]	11.6[+3.0]	12.3[-1.1]	11.6[+3.0]
Goose Bay	4.59	16.4[-6.3]	14.0[-2.5]	14.4[-4.6]	14.0[-2.5]	14.4[+3.6]	13.0[-6.0]	14.0[-2.5]	20.5[+13.1]	14.0[-2.5]
Moyenne	6.24	12.8[-2.1]	11.8[-0.5]	12.5[-3.4]	11.8[-0.5]	17.4[+8.2]	14.8[-5.7]	11.8[-0.5]	14.7[-6.6]	11.8[-0.5]


MONTREAL
TORONTO
GOOSE BAY
GARIEPY/GUEYMARD
Fréquences (%)
60
50
40
30
20
10
-30 -20 -10 0 10 20 30
GARIEPY/IQBAL
RIETVELD/GUEYMARD
RIETVELD/IQBAL
0
Erreurs relatives (%)

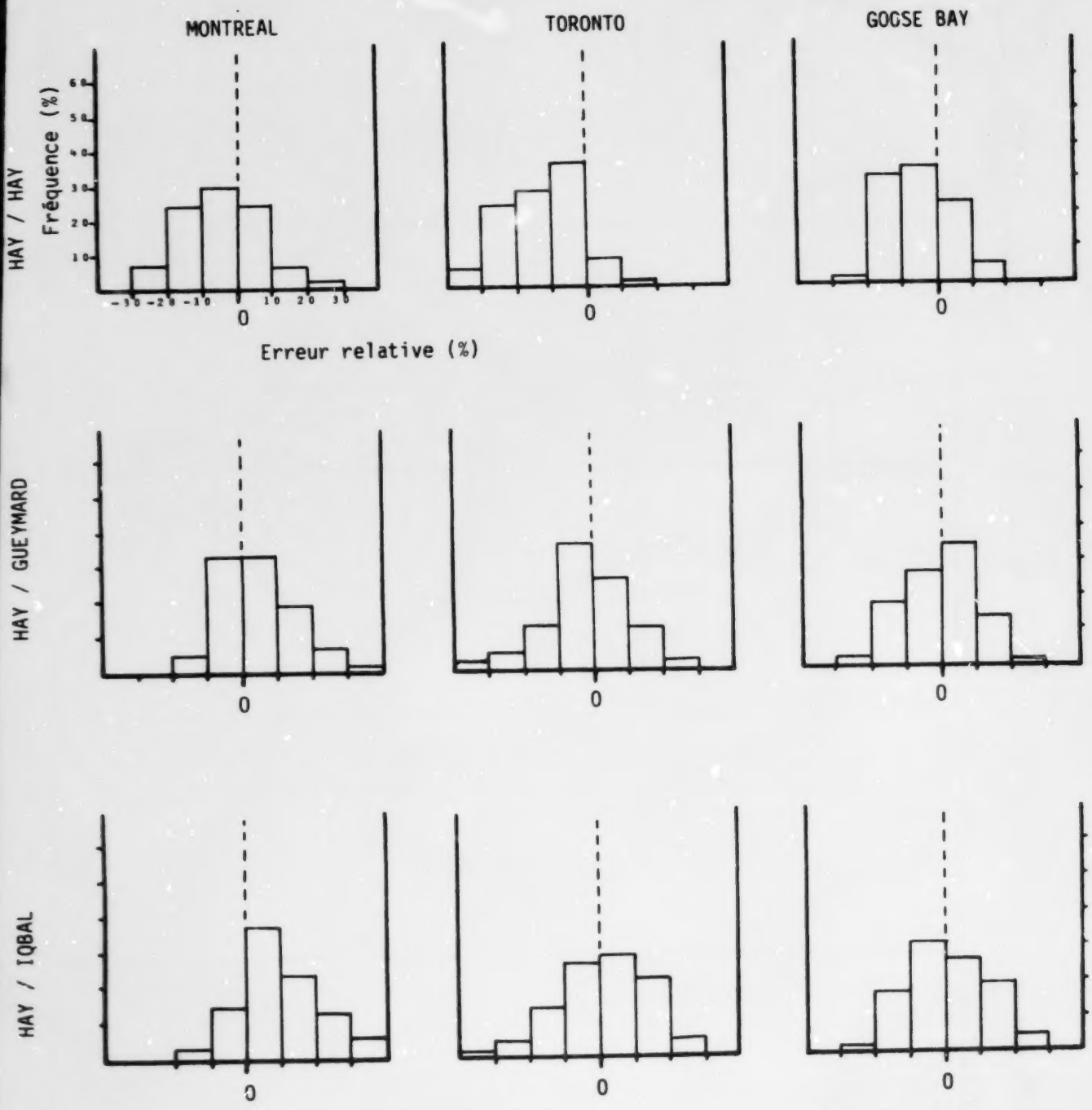


Figure 5.6 - Histogrammes des erreurs relatives pour le rayonnement diffus (suite).

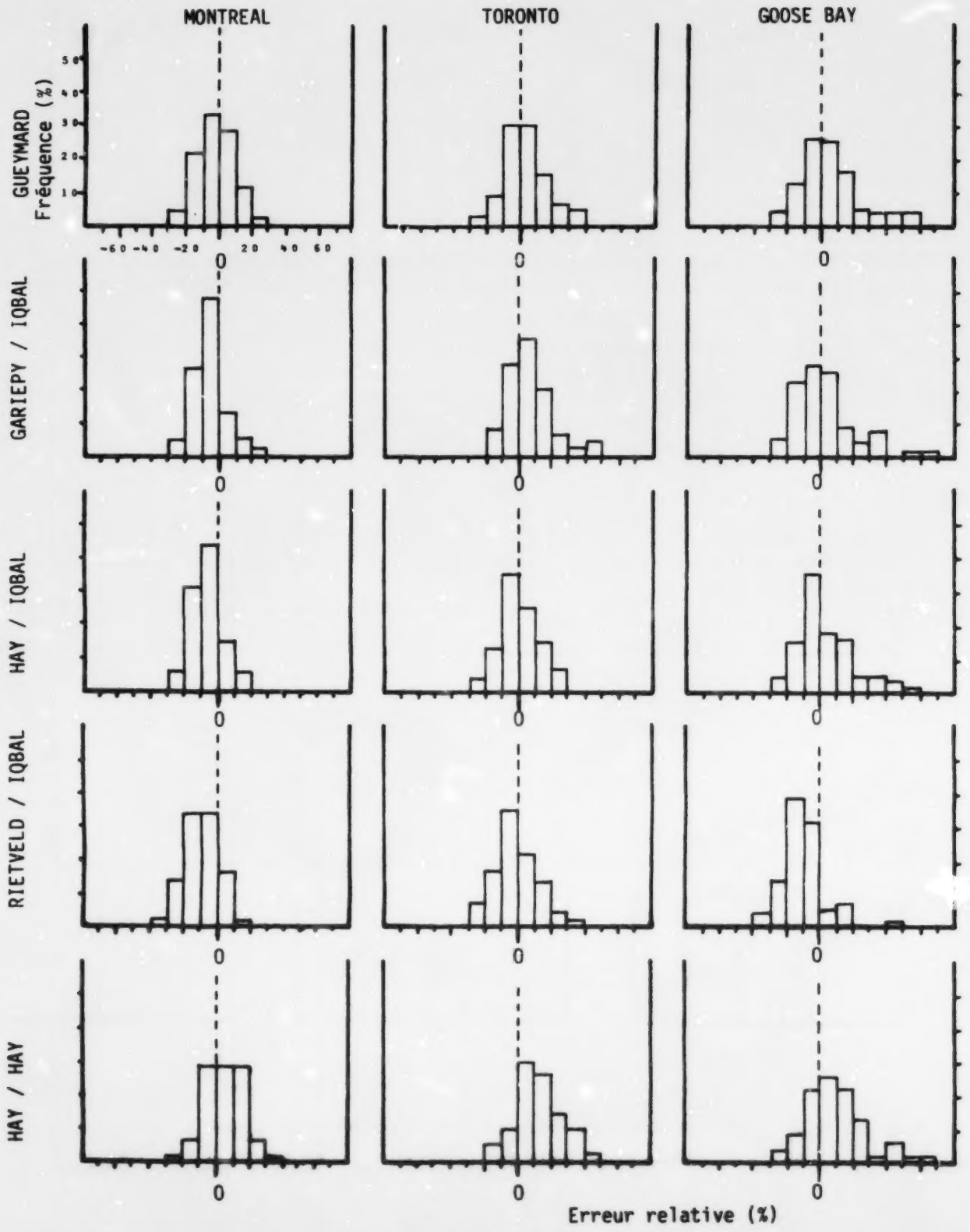


Figure 5.7 - Histogrammes des erreurs relatives pour le rayonnement direct

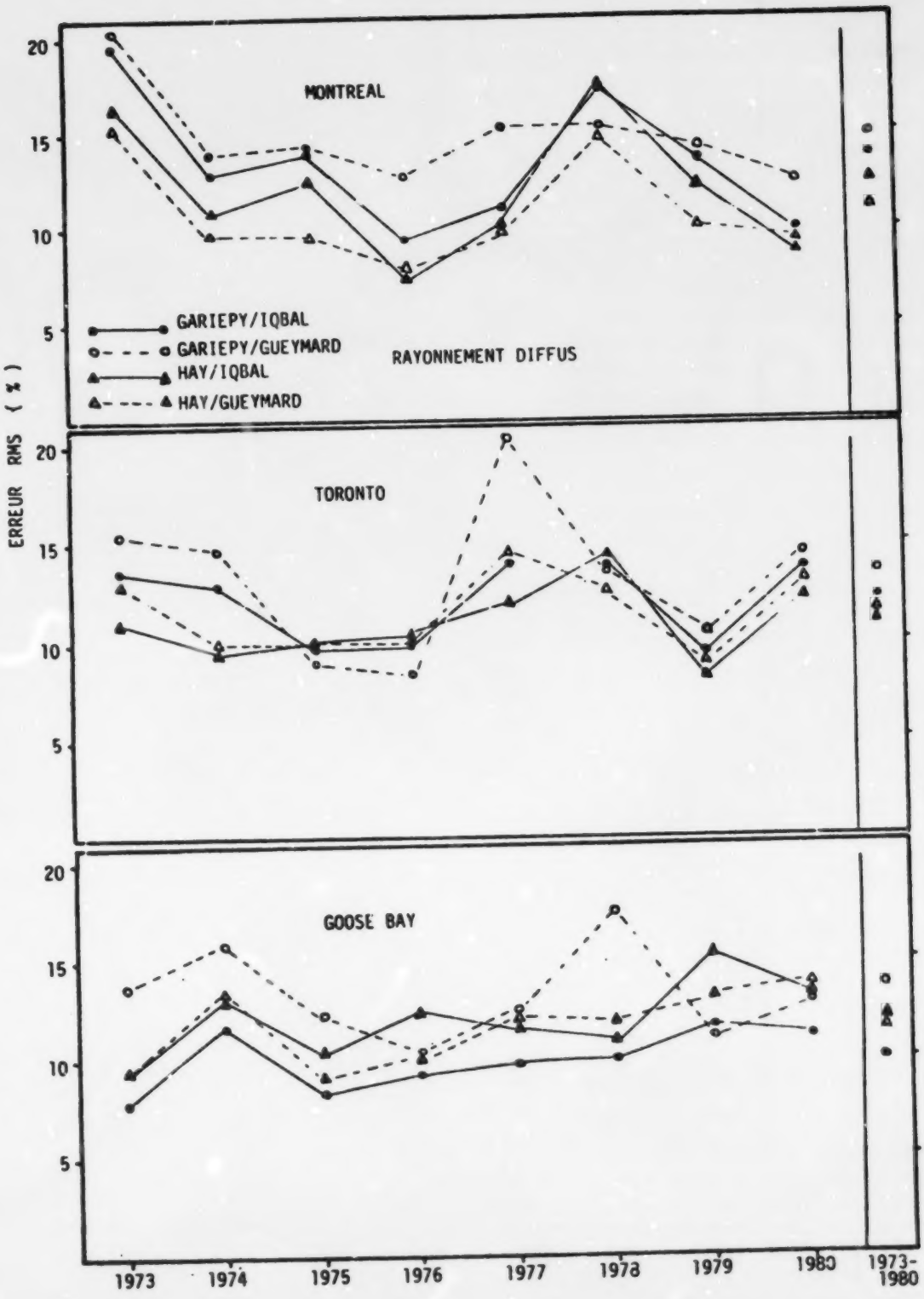


Figure 5.8 - Compilation des erreurs RMS annuelles pour le rayonnement diffus.

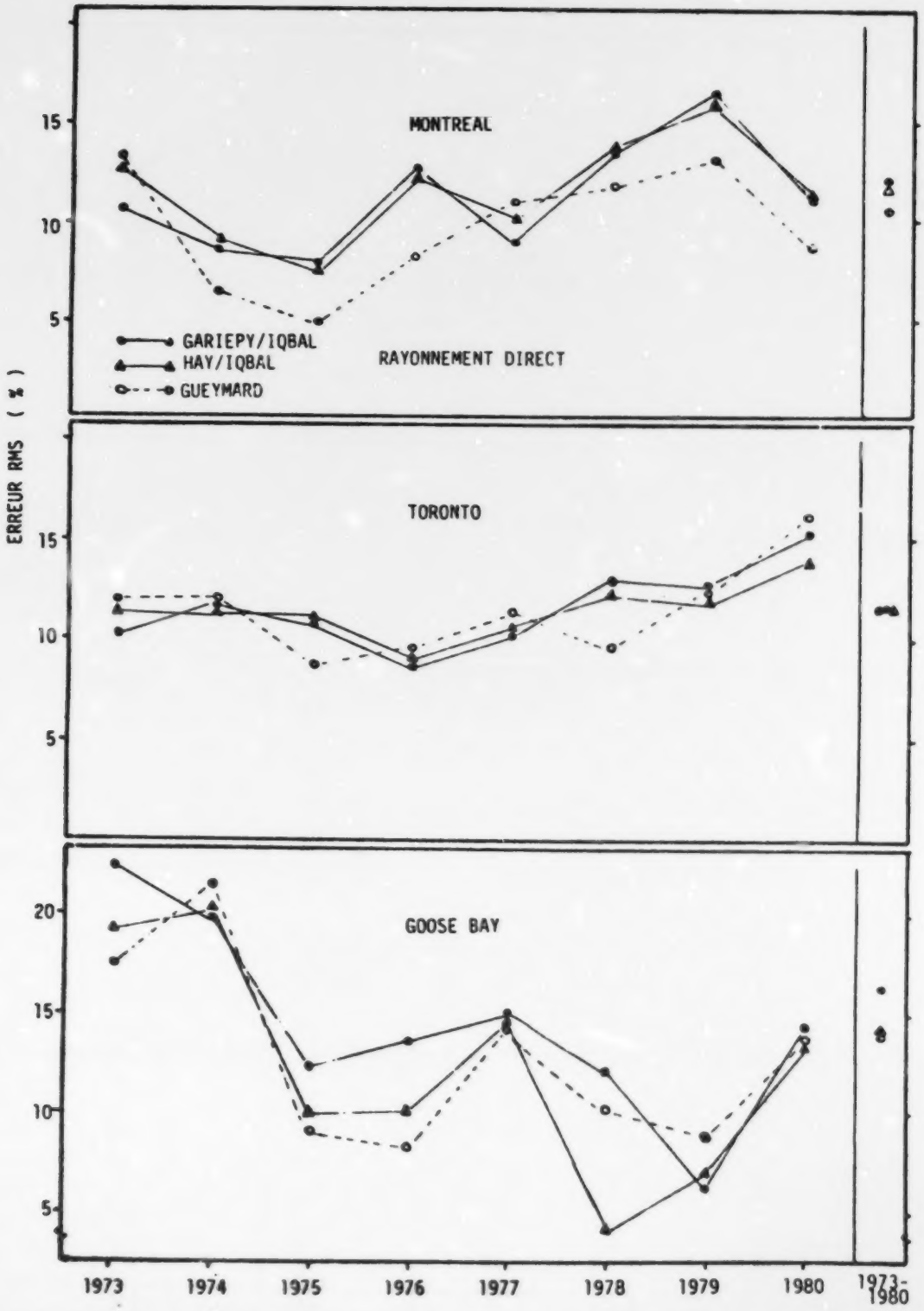


Figure 5.9 - Compilation des erreurs RMS annuelles pour le rayonnement direct.

Sur l'ensemble de ces résultats, la meilleure précision est obtenue par la combinaison Hay/Gueymard aussi bien à Montréal que pour l'ensemble des trois stations.

Une étude supplémentaire a cependant été entreprise dans le but de déceler une éventuelle sensibilité saisonnière des quatre combinaisons restant en lice. On a donc testé séparément une période hivernale et une période estivale. L'hiver a été défini arbitrairement par les mois de janvier à mars, et l'été par les mois de juin à août. Chaque saison a ainsi pu être évaluée sur un maximum de 24 points sur l'ensemble des huit années de la période.

Les résultats, toujours exprimés par les erreurs RMS et EMT en pourcentage de H_d ou H_b moyen, sont regroupés aux tableaux 5.7 et 5.8. Dans l'ensemble, une nette sensibilité saisonnière se fait sentir: malgré quelques anomalies à Goose Bay, la précision est nettement meilleure en été qu'en hiver (l'erreur RMS pouvant varier du simple au double). On observe aussi que le choix du «meilleur» modèle peut dépendre de la saison étudiée.

Ainsi, bien que la combinaison Hay/Gueymard donne les meilleurs résultats d'ensemble, la combinaison Gariépy/Iqbal s'avère plus précise pendant l'été pour le rayonnement diffus à chacune des trois stations. Pendant l'hiver, la combinaison Gariépy/Gueymard s'avère plus précise à Goose Bay toujours pour le rayonnement diffus, alors que pour la moyenne des stations, les combinaisons Hay/Iqbal et Hay/Gueymard sont sensiblement équivalentes.

Pour le rayonnement direct, la meilleure précision en hiver est apportée par la combinaison Gariépy/Iqbal. En été, les combinaisons Gariépy/Gueymard et Hay/Gueymard— qui sont strictement équivalentes par définition— donnent les meilleurs résultats.

5.5 Conclusion

Le choix d'un modèle de bonne précision dans la classe B22 pour le Québec et l'est du Canada nécessite une étude détaillée. Les quatre modèles de base retenus pour l'analyse reposent tous sur la corrélation classique de Kimball-Angström-Page. Cependant, les meilleurs résultats ont été obtenus par les modèles incorporant des paramètres climatiques supplémentaires. Le modèle d'Iqbal, purement statistique et basé uniquement sur la durée d'insolation n'a pas donné de résultats satisfaisants ce qui peut être dû en partie au fait qu'il a été développé à partir de données à long terme.

Les meilleurs résultats pour l'irradiation globale ont été obtenus avec les modèles de Hay et Gariépy. La meilleure séparation direct/diffus est obtenue par la combinaison Hay/Gueymard en considérant l'ensemble des douze mois d'une année. Une sensibilité saisonnière importante est cependant à remarquer; les mois d'hiver étant beaucoup plus difficiles à modéliser que ceux d'été. La combinaison Gariépy/Iqbal s'avère la plus intéressante en hiver pour l'estimation du rayonnement direct et en été pour l'estimation du rayonnement diffus.

TABLEAU 5.7 - Comparaison des résultats saisonniers pour le calcul du rayonnement diffus avec les modèles de Gariépy et Hay. Erreurs RMS et EMT en % de H_d mesuré moyen

Calcul du global			GARIÉPY				HAY			
Calcul du diffus	Nombre cas	H_d mesuré moyen	IQBAL		GUEYMARD		IQBAL		GUEYMARD	
	hiver été	hiver été	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ
Montréal	22 23	4.23 8.61	18.4 +12.5	6.8 +0.0	20.0 +14.2	11.2 -8.3	16.6 +9.6	7.0 +2.3	16.7 +9.1	7.8 -3.4
Toronto	21 23	4.98 9.08	16.1 +4.7	8.0 -3.4	18.4 +9.4	8.9 -1.9	15.3 -3.4	9.0 -5.0	15.6 -5.2	10.2 -5.9
Goose Bay	20 20	3.90 8.41	10.5 -7.6	8.7 -1.4	7.8 -4.6	16.8 -13.3	12.8 -7.9	10.3 +4.9	11.9 -4.2	10.6 -1.2
Moyenne	63 66	4.37 8.71	16.1 +4.0	8.2 -1.8	17.1 +7.1	12.3 -7.4	15.2 -0.3	8.8 +0.4	15.2 -0.1	9.6 -3.7

TABLEAU 5.8 - Comparaison des résultats saisonniers pour le calcul du rayonnement direct avec les modèles de Gariépy et Hay. Erreurs RMS et EMT en % de H_b mesuré moyen

Calcul du global			GARIÉPY				HAY			
Calcul du direct	Nombre cas	H_b mesuré moyen	IQBAL		GUEYMARD		IQBAL		GUEYMARD	
	hiver été	hiver été	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ	HIVER	ÉTÉ
Montréal	20 22	4.55 11.02	16.3 +12.7	9.6 -5.6	17.7 -12.7	7.2 +1.0	17.7 -13.1	8.6 -3.5	17.7 -12.7	7.2 +1.0
Toronto	21 23	4.66 11.62	11.3 -3.3	12.9 +11.3	13.9 -8.3	11.7 +10.2	15.5 -10.3	11.3 +9.5	13.9 -8.3	11.7 +10.2
Goose Bay	20 16	3.37 8.21	17.2 -4.0	14.6 -12.2	19.3 -7.5	7.5 +0.2	17.5 -3.1	10.0 -6.4	19.3 -7.5	7.5 +0.2
Moyenne	61 61	4.20 10.51	14.8 +2.2	12.0 +0.1	16.8 -9.7	9.6 +4.7	16.9 -9.4	10.2 +1.3	16.8 -9.7	9.6 +4.7

Ainsi, l'irradiation directe utilisable par un système solaire à concentration pourra être avantageusement estimée au moyen de la combinaison Gariépy/Iqbal pendant l'hiver et par la corrélation de Gueymard et al. pendant l'été.

D'autre part, dans le cas d'une utilisation essentiellement hivernale pour le captage passif ou actif sans concentration en vue du chauffage domestique par exemple, la combinaison Gariépy/Iqbal peut s'avérer la plus intéressante, dans la mesure ou la part de rayonnement direct est prépondérante sur les surfaces fortement inclinées.

Enfin, la différence importante entre les résultats obtenus ici et ceux obtenus par Davies [5.5] pour le modèle de Rietveld montre que l'utilisation et l'interprétation d'un modèle— même très simple— constituent un problème délicat et une source potentielle d'imprécision.

Dans le même ordre d'idée, il faut souligner que le fait de combiner deux modèles pour obtenir séparément H, H_b et H_d peut entraîner des erreurs considérables, sans qu'il soit possible de définir a priori des critères de compatibilité.

5.6 Références

5.1- Gariépy J, 1980. Estimation du rayonnement solaire global. Rapport interne, Service de Météorologie, Québec.

5.2- Iqbal M., 1979. Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine. Solar Energy, 23: 169-173

5.3- Hay J.E., 1979. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. Solar Energy, 23: 301-307

5.4- Rietveld M.R., 1978. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. Agri. Met., 19: 243-252

5.5- Davies J.A., 1981. Models for estimating incoming solar irradiance. Rpt #81-2, Canadian Climate Center, Environnement Canada, Downsview.

5.6- Page J.K, 1964. The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. Proc. Conf. ONU, Rome 1961: 378-388

5.7- Kimball, H.H., 1919. Variation in the total and luminous solar radation with geographical position in the U.S. Mon. Wea.Rev., 47: 769-793

5.8- Angström A., 1924. Solar and terrestrial radiation. Quart. J.Roy. Met. Soc., 50: 121-126

5.9- Löf G.O.G. et al., 1966. World distribution of solar radiation. Engineering Experiment Station Rpt. 21, University of Wisconsin, Madison.

5.10- Service de l'Environnement Atmosphérique. Température et précipitation 1941-1970. UDC 551.582 (714), Downsview.

5.11- Paulin G., 1980. Simulation de l'énergie solaire au sol. Atmosphere, 18: 286-303

5.12- Gueymard C. et al., 1978. Données statistiques pour l'utilisation du rayonnement solaire à Montréal. Proc. SESCI Conf., London.

5.13- Labelle D., Gueymard C. et Bilgen E., 1978. Corrélations entre le rayonnement solaire et la durée d'insolation à Montréal. Rpt. EP-78-R-23, École Polytechnique, Montréal.

5.14- Service de l'Environnement atmosphérique. Résumé mensuel des observations météorologiques au Canada. EN-58-10 (pour l'est du Canada), Downsview.

5.15- Service de l'Environnement atmosphérique. Sommaire du rayonnement mensuel. EN-58-4, Downsview.

5.16- Gariépy J. et al., 1981. L'ensoleillement au Québec. M.P.-60, Service de la Météorologie, Québec.

CHAPITRE 6 - ANALYSE COMPARATIVE DE TROIS MODÈLES CALCULANT LE RAYONNEMENT EN VALEURS MENSUELLES À LONG TERME À PARTIR DE LA DURÉE D'INSOLATION

6.1 Introduction

L'apparition des méthodes de design simplifié des systèmes de chauffage solaire (F-chart, Solar Load Ratio...) a entraîné le besoin de disposer de valeurs de rayonnement incident à long terme, c'est-à-dire de valeurs moyennes mensuelles représentatives d'une période d'une dizaine d'années environ.

La méthode du F-chart [6.1] fournit un moyen de calculer l'énergie incidente $\bar{H}_T$ sur une surface inclinée lorsqu'on connaît l'irradiation globale $\bar{H}$ sur une surface horizontale. La référence [6.1] donne les valeurs mensuelles de $\bar{H}$ pour 200 stations américaines et 11 stations canadiennes, parmi lesquelles seulement deux stations (Montréal et Ottawa) concernent directement le Québec. Il faut cependant remarquer que:

(a) les données de rayonnement de la plupart des stations américaines sont sujettes à caution, du fait du manque de maintenance ayant entraîné une grande dérive dans la calibration des appareils de mesure[6.2].

(b) pour la plupart des pays, et le Canada en particulier, le réseau des stations de mesure du rayonnement global est de bonne qualité, mais encore plus ou moins clairsemé; or il est souvent très difficile d'extrapoler les données de rayonnement d'une région à une autre à cause de facteurs géographiques et climatiques.

(c) la séparation du rayonnement diffus et du direct semble dépendre de facteurs climatiques locaux, comme le démontre l'étude comparative récente de Deris [6.3]; elle n'est donc généralement pas réalisée avec exactitude par la relation de Liu et Jordan préconisée par Beckman et al. [6.1].

Ainsi il apparaît très important de pouvoir calculer les irradiations globale et diffuse ($\bar{H}$ et $\bar{H}_d$) à partir de données climatiques mesurées par un réseau suffisamment dense et depuis de nombreuses années. Le paramètre le mieux désigné pour cela semble être la durée d'insolation, comme il ressort des chapitres 1, 2 et 5.

Dans ce chapitre, on analyse plus spécifiquement trois modèles récents qui ont en commun d'avoir été établis sur des données canadiennes, de fournir des valeurs mensuelles d'irradiation globale (et diffuse pour deux modèles seulement), et enfin d'être manipulables sans ordinateur. Ces modèles sont ceux de Gariépy [6.4], Hay [6.5] et Iqbal [6.6], déjà étudiés au chapitre 5 dans une autre optique.

Pour se référer à la classification générale introduite au chapitre 2, on remarquera qu'un seul de ces modèles (Iqbal) a été conçu spécifiquement pour des données moyennes à long terme, en correspondance avec

la classe B23 de la grille proposée au chapitre 2. Les deux autres modèles (Hay et Gariépy) fournissent normalement des données moyennes mensuelles particulières puisqu'appartenant à la classe B22 de notre grille. Les trois modèles ont déjà été testés au chapitre 5 pour ce type de données.

L'évaluation conjointe de ces trois modèles, bien qu'appartenant à deux classes différentes, est justifiée par:

- le manque de modèles spécifiques à la classe B23 qui concerne l'application envisagée.
- l'intérêt de vérifier si un modèle prévu pour être alimenté des données réduites sous forme de moyennes journalières pour un mois particulier, peut également être alimenté par des valeurs moyennes mensuelles à long terme, sans perte de précision.
- les efforts de calcul qui sont apparemment du même ordre pour ces modèles.
- la recherche du modèle le plus satisfaisant pour l'opération du F-chart ou des méthodes équivalentes, pour une région donnée.

L'évaluation consistera à comparer les résultats obtenus par ces trois modèles, sur la base de données à long terme, aux moyennes mensuelles du rayonnement mesuré à huit stations de l'est du Canada, comme au chapitre 5. La moitié seulement de ces stations est représentative des régions habitées du Québec. Les quatre autres stations ont été choisies dans des zones climatiques contigues de manière à étendre l'échantillonnage à une centaine de points de mesure (8 stations x 12 mois par station = 96 points).

Les conclusions qui seront tirées ne concerneront donc que la validité des dits modèles pour ce type de données et pour les régions climatiques considérées.

On conviendra dans la suite que les paramètres intervenant dans les équations de base de chaque modèle seront symbolisés de la manière la plus courante, c'est-à-dire que la barre surmontant une lettre (par exemple $\overline{H}$) indique une valeur moyenne à long terme, alors que la lettre seule (par exemple H) indique une valeur journalière moyenne pour un mois particulier.

6.2 Description des modèles

Les modèles de Gariépy et de Hay ont déjà été présentés au chapitre 5. Leur description ne sera pas reprise ici, puisque la seule différence est l'utilisation de valeurs moyennes mensuelles à long terme au lieu de valeurs moyennes mensuelles particulières.

Par souci de clarté et de respect des notations, les algorithmes de ces modèles apparaissent aux tableaux 6.1 et 6.2. Les valeurs mensuelles moyennes de δ et I_{on} ont été données au tableau 5.1.

En ce qui concerne le modèle d'Iqbal dont l'algorithme apparaît au tableau 6.3, on remarque que la relation classique de type Kimball-Angström-Page (où $\overline{K}_T$ est fonction linéaire de $\overline{\sigma}$) n'est pas donnée

TABLEAU 6.1 - Algorithme du modèle de Gariépy.

Pour des angles en degrés et I_{on} en MJ $m^{-2} h^{-1}$ (voir tableau 5.1):

$$\omega_o = \text{Arc cos } (-\tan\phi \tan\delta) \quad (6.1)$$

$$\bar{N}_o = \omega_o / 7.5 \quad (6.2)$$

$$\bar{\sigma} = \bar{n} / \bar{N} \quad (6.3)$$

$$\bar{H}_o = 4.8 \times 10^{-4} I_{on} \cos\phi \cos\delta \left(\sin\omega_o - \frac{\pi\omega_o}{180} \cos\omega_o\right) \quad (6.4)$$

$$A = 0.3791 - 0.0041 \bar{T}_a - 0.0176 \bar{P} \quad (6.5)$$

$$B = 0.4810 + 0.0043 \bar{T}_a + 0.0097 \bar{P} \quad (6.6)$$

$$\bar{K}_T = A + B \bar{\sigma} \quad (6.7)$$

$$\bar{H} = \bar{K}_T \bar{H}_o \quad (6.8)$$

TABLEAU 6.2 - Algorithme du modèle de Hay modifié.

Pour des angles en degrés et I_{on} en MJ $m^{-2} h^{-1}$ (voir tableau 5.1):

$$\omega_o = \text{Arc cos } (-\tan\phi \tan\delta)$$

$$\bar{N}_5 = \text{Arc cos } \left(\frac{\sin 5}{\cos\phi \cos\delta} + \cos\omega_o\right) / 7.5 \quad (6.9)$$

$$\bar{\sigma}' = \bar{n} / \bar{N}_5 \quad (6.10)$$

$$\bar{H}_o = 4.8 \times 10^{-4} I_{on} \cos\phi \cos\delta \left(\sin\omega_o - \frac{\pi\omega_o}{180} \cos\omega_o\right)$$

$$\bar{K}_T' = 0.1572 + 0.5566 \bar{\sigma}' \quad (6.11)$$

$$\bar{K}_r = \rho_r (0.6989 - 0.6288 \bar{K}_T') \quad (6.12)$$

$$\bar{K}_T = \bar{K}_T' / (1 - \bar{K}_r) \quad (6.13)$$

$$\bar{H} = \bar{K}_T \bar{H}_o \quad (6.14)$$

$$\bar{K}'' = 0.972 + 1.6688 \bar{K}_T - 21.303 \bar{K}_T^2 + 51.288 \bar{K}_T^3 - 50.081 \bar{K}_T^4 + 17.551 \bar{K}_T^5 \quad (6.15)$$

$$\bar{K}_d = \bar{K}_T' \bar{K}'' + \bar{K}_T \bar{K}_r \quad (6.16)$$

$$\bar{H}_d = \bar{K}_d \bar{H}_o \quad (6.17)$$

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (6.18)$$

Tableau 6.3 - Algorithme du modèle d'IQBAL initial pour des angles en degrés, et I_{on} en MJ m^{-2} h^{-1} (voir tableau 5.1):

$$\omega_o = \text{Arc cos } (-\tan \phi \tan \delta)$$

$$\bar{N}_o = \omega_o / 7.5$$

$$\bar{\sigma} = \bar{n} / \bar{N}_o$$

$$\bar{H}_o = 4.8 \times 10^{-4} I_{on} \cos\phi \cos\delta \left(\sin \omega_o - \frac{\pi \omega_o}{180} \cos \omega_o\right)$$

$$\bar{K}_d = 0.163 + 0.478 \bar{\sigma} - 0.655 \bar{\sigma}^2 \qquad (6.19)$$

$$\bar{H}_d = K_d H_o \qquad (6.20)$$

$$\bar{K} = 0.791 - 0.635 \bar{\sigma} \qquad (6.21)$$

$$\bar{H}_d = \bar{K} \bar{H} \qquad (6.22)$$

$$\bar{K}_b = -0.176 + 1.450 \bar{\sigma} - 1.120 \bar{\sigma}^2 \qquad (6.23)$$

$$\bar{H}_b = \bar{K}_b \bar{H}_o \qquad (6.24)$$

explicitement par Iqbal bien qu'il la préconise pour le calcul de $\bar{H}$. Une première solution pour calculer $\bar{H}$ est donc de combiner (6.19) et (6.23), ce qui donne par simple addition:

$$\bar{K}_T = -0.013 + 1.928\ \bar{\sigma} - 1.775\ \bar{\sigma}^2 \qquad (6.25)$$

Une deuxième solution consiste à suivre la recommandation d'Iqbal et à chercher une relation entre $\bar{K}_T$ et $\bar{\sigma}$ par régression linéaire. En reprenant les données des mêmes stations utilisées par Iqbal, nous avons obtenu la relation suivante:

$$\bar{K}_T = 0.3152 + 0.3717\ \bar{\sigma} \qquad (6.26)$$

avec un coefficient de corrélation r = 0.656.

Le calcul de l'irradiation diffuse peut également s'effectuer de plusieurs manières (on conviendra dans la suite de comparer les résultats sous forme fractionnaire, $\bar{K}_d$, plutôt que dimensionnelle, $\bar{H}_d$, de même que pour le rayonnement global):

- soit directement par la relation (6.19)
- soit par la relation (6.23) modifiée sous la forme:

$$\bar{K}_d = \bar{K}_T + 0.176 - 1.450\ \bar{\sigma} + 1.120\ \bar{\sigma}^2 \qquad (6.27)$$

- soit en utilisant une autre corrélation développée par Iqbal [6.7] à partir de données de Toronto et Montréal:

$$\bar{K} = \bar{H}_d/\bar{H} = 0.958 - 0.982\ (\bar{H}/\bar{H}_0)$$

d'où
$$\bar{K}_d = 0.958\ \bar{K}_T - 0.982\ \bar{K}_T^2 \qquad (6.28)$$

- soit enfin par la relation (6.21) mise sous forme:

$$\bar{K}_d = (0.791 - 0.635\ \bar{\sigma})\ \bar{K}_T \qquad (6.29)$$

On remarquera que les trois dernières solutions (indirectes) nécessitente de connaître K_T, alors que la première solution (directe) nécessite seulement σ.

Le calcul de l'irradiation directe peut encore se faire de différentes manières:

- soit directement par la relation (6.23)
- soit par la relation (6.19) modifiée sous la forme:

$$\bar{K}_b = \bar{K}_T - 0.163 - 0.478\ \bar{\sigma} + 0.655\ \bar{\sigma}^2 \qquad (6.30)$$

- soit au moyen de la relation (6.28):

$$\bar{K}_b = 0.042\ \bar{K}_T + 0.982\ \bar{K}_T^2 \qquad (6.31)$$

- soit enfin par la relation (6.29) réarrangée:

$$\bar{K}_b = (0.209 + 0.635\ \bar{\sigma})\ \bar{K}_T \qquad (6.32)$$

6.3 Méthode d'évaluation

Les résultats fournis par les trois modèles sont comparés aux données de rayonnement mesuré, après compilation de celles-ci sous forme de moyennes mensuelles à long terme. Les données utilisées sont tirées

de publications faciles à obtenir [6.8, 6.9, 6.10].

Les huit stations choisies pour les tests sont identiques à celles déjà utilisées au chapitre 5. Elles ont toutes accumulées au moins dix ans de données de rayonnement global et d'insolation (sauf Sept-Iles). Le tableau 6.4 résume les principales caractéristiques climatiques de ces stations, tandis que le tableau 5.2 donne les valeurs mensuelles de ρ_r nécessaires pour opérer le modèle de Hay.

Comme au chapitre 5, aucun ajustement des données n'a été fait pour tenir compte de l'influence des masques naturels sur les mesures de $\bar{n}$.

Cependant, d'autres sources d'inhomogénéité des données se rajoutent dans le cas des données à long terme. Ainsi l'insolation et le rayonnement ne sont pas mesurés au même endroit à Ottawa, de même qu'à Toronto pour la période étudiée. D'autre part, les durées des séries de mesures utilisées dans les références [6.8] à [6.10] pour le calcul des normales climatiques ne coïncident jamais pour une station en particulier, ni d'une station à l'autre (tableau 6.4). Ces problèmes empêchent donc a priori tout jugement portant sur la précision intrinsèque des modèles étudiés, c'est-à-dire la précision qui serait obtenue avec des séries de données idéalement homogènes. L'optique envisagée ici est donc celle de l'utilisateur qui veut se baser sur des données publiées sans les modifier.

Les erreurs moyennes de tendance(EMT) et quadratiques moyennes (RMS) ont été calculées en comparant valeurs calculées et mesurées sur l'ensemble des douze mois pour chaque station, et exprimées en pourcentage des paramètres adimensionnels $\bar{K}_T$, $\bar{K}_d$ ou $\bar{K}_b$. En effet, $\bar{K}_T$, (en particulier), est largement utilisé comme base de calcul de $\bar{K}_d$, du facteur R (conversion du rayonnement entre plan horizontal et plan incliné), et de l'utilisabilité (voir par exemple les références [6.1], [6.11] à [6.13]).

Les erreurs relatives mensuelles ont également été réparties par tranches de 10%, en jugeant «acceptables» les erreurs comprises entre -10 et +10% de $\bar{K}_T$, $\bar{K}_d$ ou $\bar{K}_b$, et «inacceptables» les erreurs dépassant -20 ou +20%.

Pour les irradiations diffuse et directe, plusieurs combinaisons de modèles ont été essayées, dans le but d'augmenter éventuellement la précision de l'estimation obtenue avec les modèles existants. De plus, ces irradiations moyennes ont été calculées soit à partir du rayonnement global mesuré, soit à partir des valeurs calculées, de façon à tester la consistance des estimations (un «bon» modèle devant a priori fournir des valeurs de $\bar{K}_d$ ou $\bar{K}_b$ comparables dans ces deux cas).

6.4 Résultats et discussion

6.4.1 Rayonnement global

Les résultats d'ensemble sont présentés au tableau 6.5. On constate que sur l'ensemble des huit stations considérées, la corrélation linéaire

Tableau 6.4 Liste des stations utilisées pour les test et valeurs moyennes annuelles des normales climatiques considérées. Le nombre d'années de données est indiqué entre crochets.

	Valeurs moyennes annuelles [Nombre d'années de données]				
	T_a (°C)	$\bar{P}$ (cm)	$\bar{n}$ (heures)	$\bar{H}$ (MJ m^{-2})	$\bar{H}_d$ (MJ m^{-2})
Montréal, Qué. (4)	6.2 [14]	97.5 [13]	5.64 [10-29] (5)	12.43 [11]	5.75 [13]
Toronto, Ont.	7.8 (1) [14]	78.2 (1) [13]	5.60 (2) [30]	13.34 (3) [10]	6.22 (3) [10]
Goose Bay, T.N.	0.2 [29]	87.7 [29]	4.29 [10-29] (5)	10.76 [15]	5.85 [14]
Ottawa, Ont.	6.1 (6) [19]	85.2 (6) [18]	5.46 (7) [30]	13.12 (6) [20]	-
Frédéricton, N.B.	5.3 [57]	108.4 [57]	5.09 [30]	12.32 [17]	-
Normandin, Qué.	1.1 [34]	80.4 [34]	4.99 [30]	12.37 [16]	-
Sept-Iles, Qué.	1.2 [26]	109.0 [26]	5.62 [<10] (5)	11.74 [5]	-
Moosonee, Ont.	-0.9 [37]	78.5 [37]	4.39 [10-29] (5)	11.45 [14]	-

Notes:
(1) Mesuré à Downsview Airport
(2) Mesuré à Bloor St.
(3) Mesuré au Meteorological Research Station
(4) Collège Jean Brebeuf
(5) La publication [6.9] ne précise pas toujours le nombre exact d'années
(6) Mesuré au NRC
(7) Mesuré au CDA.

Tableau 6.5 Performance moyenne annuelle des modèles pour le rayonnement global. Erreur RMS et erreur de tendance en % de $\bar{K}_T$.

Station	$\bar{K}_T$ mesuré moyen	Erreur RMS [erreur de tendance] en % de $\bar{H}/\bar{H}_o$ moyen			
		IQBAL éq. (6.25)	IQBAL éq. (6.26)	HAY éq. (6.15-17)	GARIEPY éq. (6.5-6.7)
Montréal	0.4598	7.2 [+4.3]	8.6 [+5.0]	5.4 [+3.9]	6.4 [+4.7]
Toronto	0.4799	8.3 [-1.8]	8.9 [+0.2]	8.0 [-2.5]	7.8 [3.0]
Goose Bay	0.4651	10.6 [-5.4]	11.2 [-4.4]	8.0 [-3.6]	8.4 [-4.7]
Ottawa	0.4885	7.6 [-3.1]	8.7 [-2.4]	7.0 [-4.4]	4.7 [-1.0]
Frédéricton	0.4670	5.9 [+1.8]	6.4 [+9.2]	5.1 [-2.6]	5.9 [-4.9]
Normandin	0.4943	13.4 [-6.3]	14.1 [+0.9]	10.8 [-6.7]	8.4 [-3.1]
Sept-Iles	0.4785	8.8 [+2.4]	9.0 [+1.2]	9.1 [+5.2]	7.9 [-0.5]
Moosonee	0.4762	16.7 [-10.4]	14.3 [-6.8]	11.3 [-8.2]	6.8 [-4.0]
Moyenne	0.4762	9.8 [-2.4]	10.2 [+0.3]	8.1 [-2.4]	7.0 [-1.3]

purement empirique (formule 6.26) donne le moins bon résultat en considérant l'erreur RMS, mais le meilleur en considérant l'erreur EMT, qui est presque nulle, alors que tous les autres modèles ont une légère tendance à la sous-estimation systématique de $\bar{K}_t$. Une très légère amélioration est seulement obtenue par la formule (6.25). Ces résultats confirment donc les résultats du chapitre 5, à savoir la tendance de ces relations empiriques à être relativement imprécises et très dépendantes du climat. Ce dernier point apparaît lorsqu'on considère la nette augmentation des erreurs à mesure que l'on s'éloigne des stations utilisées par Iqbal pour bâtir son modèle. À Moosonee par exemple, on atteint l'erreur RMS maximum (16.7%) avec une forte tendance à la sous-estimation.

Le modèle Hay (formules 6.9 à 6.14) apporte une nette amélioration, avec une erreur RMS moyenne de 8.1% sur l'ensemble des stations, mais au prix d'une légère tendance à la sous-estimation. Ce modèle a été bâti sur des données provenant de régions éloignées, et de plus compilées différemment de celles utilisées pour l'évaluation. Il est fort probable qu'il pourrait être ajusté pour la région étudiée en recalculant les coefficients de régression. Comme dans le cas d'Iqbal, on remarquera la sous-estimation de plus en plus prononcée dans les régions septentrionales (Sept-Iles, Normandin, Moosonee).

Enfin, le modèle de Gariépy obtient le meilleur résultat d'ensemble quant à l'erreur RMS (7% pour les huit stations), ce qui n'est peut-être pas étranger à la non-indépendance des données utilisées pour le test. Pour vérifier cette hypothèse, on peut recommander qu'une comparaison avec le modèle de Hay soit faite dans d'autres régions du Canada, de façon à compléter la présente évaluation. Bien que les résultats d'ensemble soient comparables à ceux du chapitre 5 (tableau 5.3), on peut remarquer que le modèle de Gariépy maintient mieux sa performance que celui de Hay. En restreignant l'échantillonnage aux quatre stations vraiment représentatives des régions habitées du Québec (Montréal, Normandin, Ottawa, Sept-Iles), les résultats d'ensemble apparaissent au tableau 6.6. On y observe encore que le modèle de Gariépy donne les meilleurs résultats, suivi de celui de Hay Ce classement, obtenu selon le critère de la meilleure erreur RMS, est encore confirmé si l'on considère la proportion des erreurs «acceptables» (P_{10-}) et la proportion des erreurs «inacceptables» (P_{20+}).

D'un point de vue régional, les résultats détaillés permettent d'observer que les trois modèles donnent de très bonnes estimations à Frédéricton. Le modèle de Gariépy est également excellent à Ottawa. D'un point de vue saisonnier, le modèle de Gariépy donne de bonnes estimations de manière régulière: janvier, février, mai à septembre étant généralement les meilleurs mois. Le modèle de Hay donne de façon aussi consistante de faibles erreurs relatives (entre -10 et 10%) entre mai et septembre, période pour laquelle le modèle d'Iqbal est également bon. Les erreurs relatives extrêmes observées sont +24.5% en novembre à Toronto pour le modèle de Gariépy, +22.2% en décembre à Sept-Iles pour le modèle de Hay, et -32% en décembre à Moosonee pour l'équation (6.25) d'Iqbal.

Tableau 6.6 - Précision des estimations du rayonnement global avec les modèles de Gariépy, Hay et Iqbal: récapitulation des résultats

		4 stations (Montréal, Normandin, Sept-Iles, Ottawa) $\overline{K}_T$ = 0.4803	8 stations (ensemble des données) $\overline{K}_T$ = 0.4762
Modèle GARIEPY (éq. 6.5-6.7)	EMT (%)	-0.05	-4.0
	RMS (%)	7.0	6.8
	P_{10-} (1) (%)	81	81
	P_{20+} (2) (%)	0	1
Modèle HAY (éq. 6.15-6.17)	EMT (%)	-0.6	-2.4
	RMS (%)	8.4	8.1
	P_{10-} (1) (%)	81	79
	P_{20+} (2) (%)	2	2
Modèle IQBAL (éq. 6.25)	EMT (%)	-0.8	-2.4
	RMS (%)	9.6	9.8
	P_{10-} (1) (%)	69	69
	P_{20+} (2) (%)	4	7

Notes (1) P_{10-} : Pourcentage des mois où la valeur absolue de l'erreur relative mensuelle est inférieure à 10% (erreurs "acceptables")

(2) P_{20+} : Pourcentage des mois où la valeur absolue de l'erreur relative mensuelle est supérieure à 20% (erreurs "inacceptables").

6.4.2 Rayonnement diffus

Les résultats rassemblés au tableau 6.7 suggèrent les constatations suivantes:

— le calcul du diffus au moyen du seul paramètre $\bar{\sigma}$ (relation 6.19 du modèle d'Iqbal) donne des résultats médiocres alors que cette procédure semblait la plus directe.

— De même, le calcul du diffus par corrélation avec le global (relation 6.28) est décevant. Une inspection détaillée des valeurs mensuelles montre en particulier que $\overline{K}_d$ varie très peu en dessous de la valeur limite 0.2336 qui correspond au maximum de cette fonction parabolique pour $\overline{K}_T$ = 0.4878, alors que les valeurs mesurées varient de façon beaucoup plus importante, d'où des erreurs sur $\overline{K}_d$ de 20% et plus pour certains mois. Il faut cependant reconnaître que cette formule a été élaborée à partir des données de Montréal et Toronto seulement, villes pour lesquelles la performance est effectivement meilleure. Cette imprécision ne semble pas suivre d'évolution saisonnière, et peut résulter de la conjonction de plusieurs facteurs (rétrodiffusion, turbidité de l'air, masse atmosphérique...) qui ne sont pas pris en compte dans la formule. Ce phénomène est inquiétant dans la mesure où ce type de relation est largement employé depuis les travaux de Liu et Jordan [6.13] et Page [6.14].

— La meilleure détermination de $\overline{K}_d$ est obtenue par la formule 6.29 tirée d'Iqbal. L'erreur RMS est alors de 5.7% sur l'ensemble des stations (pour H mesuré) et de 11% pour H calculé par la formule 6.25. Cette méthode s'accompagne cependant d'une tendance à la surestimation de $\overline{K}_d$, surtout à Montréal.

— Contrairement à ce que l'on pouvait attendre en raison des résultats obtenus pour $\overline{K}_T$, les formules 6.15 à 6.17 de Hay donnent de moins bons résultats que la formule 6.29 d'Iqbal. Les coefficients de la relation 6.15 sont probablement la cause de la sous-estimation importante, soit par un effet de sensibilité climatique, soit du fait que cette relation a été obtenue à l'origine par régression avec des données horaires.

Cependant, les résultats obtenus par le modèle de Hay sont légèrement meilleurs que ceux de la formule 6.19 d'Iqbal à Montréal. De plus, l'équation (6.28) d'Iqbal donne la meilleure estimation de $\overline{K}_d$ lorsque $\overline{H}$ est calculé, toujours à Montréal. Donc si l'on convient que la station de Montréal est beaucoup plus représentative que celles de Toronto et Goose Bay pour le Québec habité, le choix d'un modèle de calcul du diffus devient difficile.

Or, on peut considérer que, pour de nombreuses applications du chauffage solaire, le captage du rayonnement se fait sur un plan incliné pour lequel la part de rayonnement direct relativement à l'irradiation totale est généralement prépondérante. Dans ces conditions, le choix d'un modèle de calcul du diffus est lié, voire même subordonné, à celui d'un modèle de calcul du direct.

6.4.3 Rayonnement direct

Une fois les irradiations globale et diffuse calculées, on peut en déduire l'irradiation directe par soustraction ($\overline{K}_b = \overline{K}_T - \overline{K}_d$, puisque $H_b = H - H_d$) de la même façon que pour les valeurs mesurées.

Tableau 6.7 Performance moyenne annuelle des modèles pour le rayonnement diffus.

Station	$\overline{K}_d$ mesuré moyen	$\overline{H}$	Erreur RMS erreur de tendance en % de $\overline{H}_d/\overline{H}_o$ moyen				
			IQBAL				HAY
			éq. (6.19)	éq. (6.27)	éq. (6.28)	éq. (6.29)	éq. (6.15-6.17)
Montréal	0.2217	calc.	11.8 [+8.0]	11.7 [+7.8]	9.3 [+ 4.5]	11.6 [+7.8]	11.0 [- 7.3]
		mes.		7.4 [-0.9]	8.6 [+ 3.7]	6.2 [+3.4]	11.3 [- 7.9]
Toronto	0.2362	calc.	9.5 [+0.6]	9.5 [+0.6]	10.2 [- 2.0]	10.2 [+1.5]	16.0 [-14.5]
		mes.		11.6 [+4.2]	9.4 [- 2.8]	7.6 [+1.8]	15.1 [-13.8]
Goose Bay	0.2589	calc.	11.7 [-4.0]	11.7 [-4.0]	15.5 [-11.0]	11.4 [-3.6]	11.0 [- 9.6]
		mes.		5.9 [+5.8]	15.6 [-11.2]	3.5 [+1.9]	8.9 [- 6.9]
Moyenne	0.2389	calc.	11.0 [+1.32]	11.7 [+1.2]	11.8 [- 3.3]	11.0 [+1.6]	12.6 [- 9.9]
		mes.		8.3 [+3.2]	11.4 [- 3.8]	5.7 [+2.3]	11.7 [- 9.5]

L'évaluation des modèles de Hay et d'Iqbal a donc été faite de cette manière. Les résultats généraux (tableau 6.8) montrent que le modèle de Hay entraîne des surestimations importantes, ce qui est logique dans la mesure où le global était bien estimé, et le diffus très sous-estimé.

Comme dans le cas du diffus, on a vu que plusieurs possibilités de calculer le direct sont possibles en utilisant les formules d'Iqbal. Les résultats du tableau 6.8 montrent que lorsque les valeurs mesurées de global sont disponibles, l'équation (6.32) fournit de très bons résultats, comme dans le cas du diffus.

Lorsque l'on doit calculer le global, une précision correcte est obtenue avec l'équation (6.23), qui s'avère légèrement meilleure que la combinaison des équations (6.25) et (6.32).

6.4.4 Recherche d'une combinaison optimale

Dans le calcul du diffus comme du direct, l'équation (6.29) donne de bons résultats lorsqu'on peut utiliser des valeurs mesurées de $\overline{H}$. Mais lorsque ces mesures ne sont pas disponibles, les résultats sont nettement moins bons. C'est le cas en particulier lorsqu'on calcule $\overline{H}$ par l'équation (6.25), qui s'était avérée moins précise que les modèles de Hay et Gariépy. Il a donc paru intéressant de combiner le calcul du global au moyen des méthodes précises (Hay et Gariépy) avec le calcul du direct et du diffus par les formules d'Iqbal.

Les résultats récapitulatifs des combinaisons testées apparaissent au tableau 6.9. On observe que pour le direct, la combinaison du modèle de Gariépy et de l'équation (6.32) s'avère la plus intéressante à Montréal et Toronto. Pour Goose Bay, c'est la combinaison du modèle de Hay et de l'équation (6.32) qui s'avère plus intéressante. Ces conclusions sont cependant inversées lorsqu'on considère la précision sur le diffus calculé.

Les histogrammes d'erreurs relatives pour les deux combinaisons sont dessinés aux figures 6.1 et 6.2. On peut y observer que la distribution des erreurs est sensiblement identiques pour les deux combinaisons, surtout à Montréal et Goose Bay.

6.5 Conclusion

La discussion précédente amène finalement à conclure que si l'on considère la station de Montréal comme plus représentative que Toronto et Goose Bay pour le climat du Québec habité, et si l'on admet la précision sur le rayonnement direct comme prioritaire, la combinaison du modèle de Gariépy et de l'équation (6.29) d'Iqbal est légèrement plus intéressante que la combinaison du modèle de Hay et de la même équation d'Iqbal.

Cependant, cette conclusion pourrait être inversée en adoptant des critères différents. Il devient donc difficile de proposer une recommandation nette sur la base des données très limitées à notre disposition.

Tableau 6.8 - Performance moyenne annuelle des modèles pour le rayonnement direct.

Station	K_b mesuré moyen	$\overline{H}$	Erreur RMS [Erreur de tendance] en % de K_b moyen				
			IQBAL				HAY
			Eq. (6.23)	Eq. (6.30)	Eq. (6.32)	Eq. (6.25) + Eq. (6.32)	Eq. (6.15 à (6.18)
Montréal	0.2381	calc.	6.9 [+1.4]	—	—	7.3 [+1.0]	17.1 [+14.2]
		mes.	6.9 [+1.4]	10.9 [-7.4]	5.8 [-3.1]	—	10.5 [+ 7.3]
Toronto	0.2437	calc.	11.2 [-4.1]	—	—	11.8 [-3.6]	17.0 [+9.4]
		mes.	11.2 [-4.1]	9.1 [-0.6]	7.4 [-1.7]	—	14.6 [+13.3]
Goose Bay	0.2062	calc.	10.4 [-7.4]	—	—	11.1 [-7.6]	8.7 [+2.0]
		mes.	10.4 [-7.4]	14.7 [+5.0]	4.3 [-3.1]	—	11.1 [+8.7]
Moyenne	0.2293	calc.	9.7 [-3.2]	—	—	10.2 [-3.2]	15.3 [+8.8]
		mes	9.7 [-3.2]	11.5 [-1.3]	14.1 [-2.6]	—	12.4 [+9.9]

Tableau 6.9 - Performance moyenne annuelle des modèles combinés pour le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

Station	$\bar{K}_b$ mesuré moyen [$\bar{K}_d$ mesuré moyen]	Rayonnement	GARIEPY / IQBAL éq. (6.19) ou (6.30)				GARIEPY / IQBAL éq. (629) ou 6.32)				HAY / IQBAL éq. (6.29) ou (6.32)			
			RMS %	EMT	P_{10-} %	P_{20+}	RMS %	EMT	P_{10-} %	P_{20+}	RMS %	EMT	P_{10-} %	P_{20+}
Montréal	0.2361 [0.2217]	direct	6.7	+1.6	83	0	6.1	-1.2	83	0	6.7	+0.6	92	0
		diffus	11.8	+8.0	58	25	11.2	+8.5	58	17	9.5	+7.3	67	8
Toronto	0.2437 [0.2362]	direct	9.1	+5.3	33	17	12.4	+1.0	58	17	13.2	-3.7	58	17
		diffus	9.5	+0.6	75	0	8.5	+5.1	75	0	7.5	-1.0	92	0
Goose Bay	0.2062 [0.2589]	direct	18.4	-5.7	42	33	11.4	-7.3	58	8	9.8	-5.9	58	8
		diffus	11.7	-4.0	67	0	7.2	-2.7	75	0	7.9	-1.6	83	0
Moyenne	0.2293 [0.2389]	direct	13.6	+0.7	53	17	9.9	-2.2	67	8	10.0	-2.8	69	8
		diffus	11.0	+1.3	67	8	8.9	+3.3	69	6	8.3	+1.4	81	3

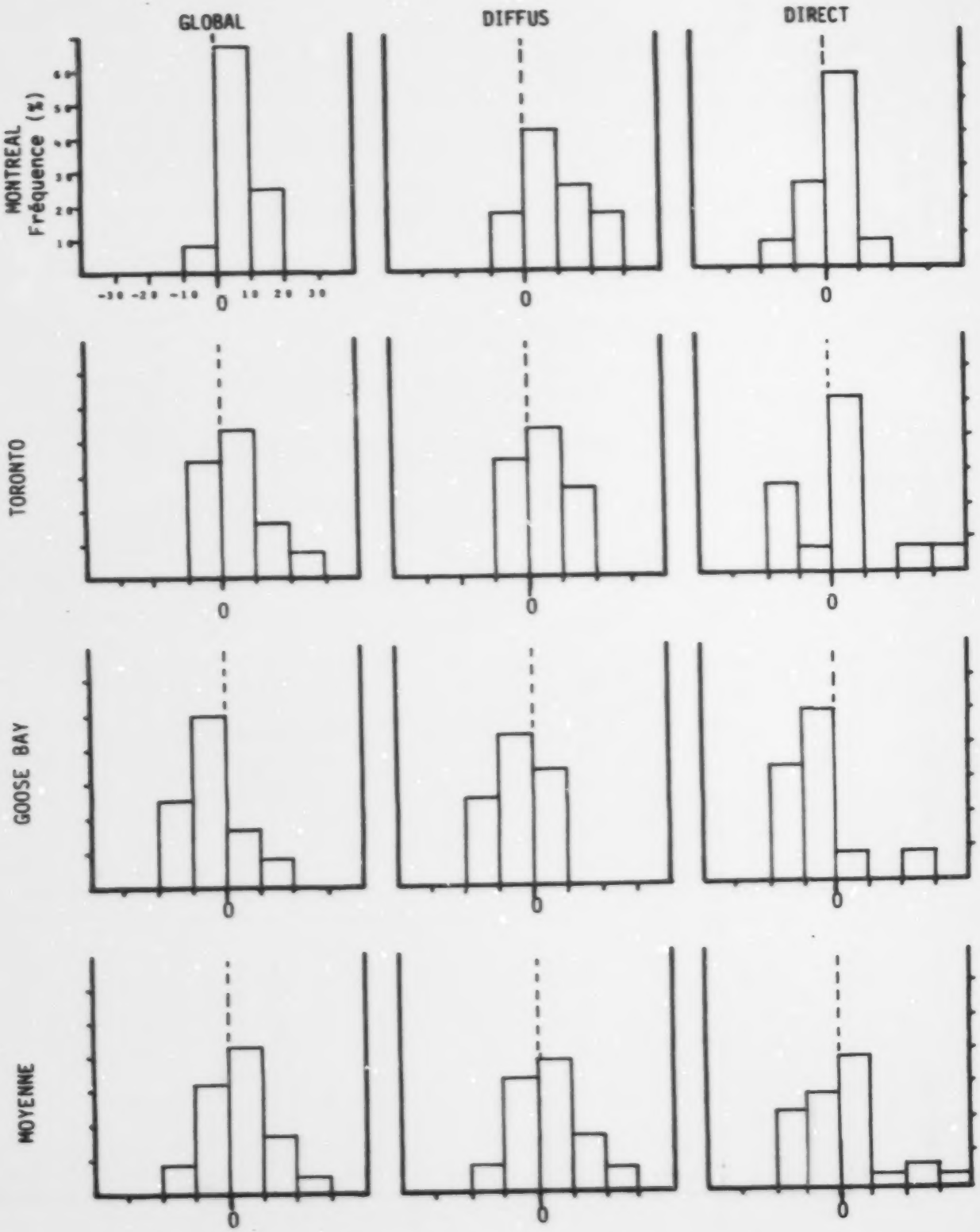


Figure 6.1 - Histogrammes des erreurs relatives pour la combinaison Gariépy/Iqbal.

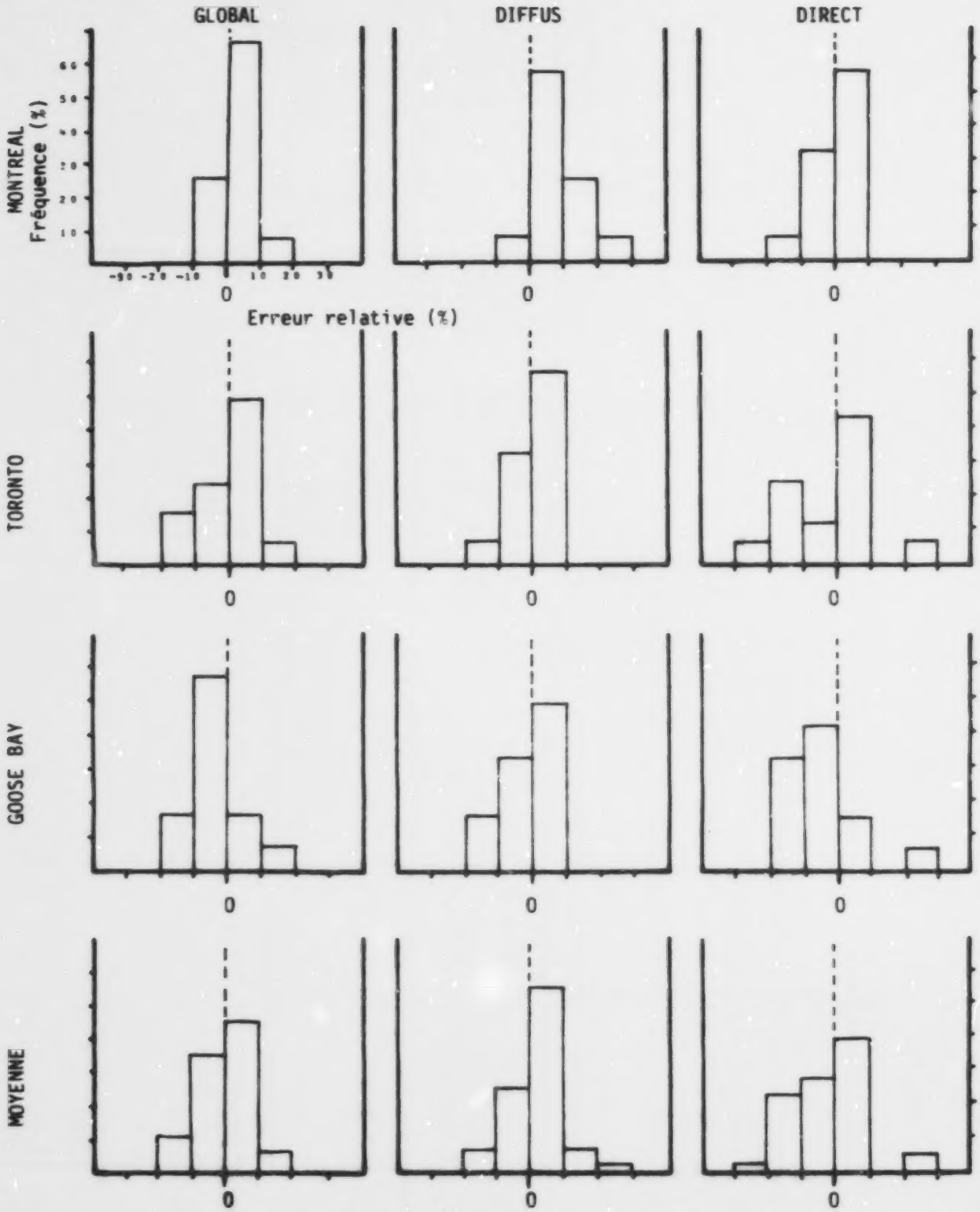


Figure 6.2 - Histogrammes des erreurs relatives pour la combinaison Hay/Iqbal.

Si l'on considère maintenant le critère de la simplicité d'utilisation et de calcul, qui peut s'avérer prioritaire pour certains utilisateurs, il est plus facile de conclure que la combinaison Gariépy/Iqbal est la plus avantageuse. Cette combinaison a d'ailleurs été utilisée par les auteurs pour générer des données radiatives de design pour 21 villes au Québec [6.15].

D'autre part, les résultats obtenus ici confirment dans l'ensemble ceux obtenus au chapitre 5. En particulier, le modèle de Hay permet une bonne estimation du rayonnement global, mais s'avère inadéquat pour la séparation direct/diffus.

D'autre part, il est intéressant de noter que l'estimation des irradiations diffuse et directe obtenue avec les combinaisons Gariépy/Hay et Hay/Iqbal est meilleure avec des données à long terme qu'avec les données particulières du chapitre 5 (tableaux 5.5, 5.6 et 6.9).

Enfin, il faut mettre en garde les utilisateurs de ce genre de modèles, qui seraient tentés de combiner d'autres formules pour calculer séparément $\bar{K}_T$, $\bar{K}_d$ et $\bar{K}_b$: des résultats inconsistants risquent d'apparaître, sans qu'il soit possible de définir a priori des critères de compatibilité.

6.6 Références

6.1- Beckman W.A. et al., 1977. Solar heating design by the f-chart method. Wiley, New York.

6.2- NOAA/NSF, 1974. Solar Energy Data Workshop, Report and recommendations, Silver Spring, Nov. 1973. NSF-RA-N-74-062.

6.3- Deris N., 1980. Statistical determination of diffuse radiation in Europe and Turkey. Third Int. Conf. Alternative Energy Sources, Miami.

6.4- Gariépy J., 1980. Estimation du rayonnement solaire global. Rpt. interne, Service de Météorologie, Québec.

6.5- Hay J.E., 1979. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. Solar Energy, 23: 301-307

6.6- Iqbal M., 1979. Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine. Solar Energy, 23: 169-173

6.7- Iqbal M., 1979. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data. Solar Energy, 22: 81-86

6.8- Phillips D.W. et Aston D., 1980. Données sur le rayonnement solaire au Canada. CLI 2-80. Environnement Canada, AES, Downsview, Ont.

6.9- Yorke B.J. et Kendall G.R., 1979. Daily bright sunshine normals. CLI 6-72. Environnement Canada, AES, Downsview, Ont.

6.10- Service de l'Environnement atmosphérique (AES). Température et précipitation 1941-1970. UDC 551-582 (714) Downsview, Ont.

6.11- Duffie J.A. et Beckman W.A., 1980. Solar engineering of thermal processes. Wiley, New York.

6.12- Huget R.G. et Hollands K.G.T., 1981. A probability density function for K_T with applications to utilizability. Proc. SESCI Conf., Montréal: 153-157

6.13- Liu B.Y.H. et Jordan R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, 4: 1-19

6.14- Page J.K., 1964. The estimation of monthly mean values of daily total shortwave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. Proc. Conf. ONU, Rome, 1961: 378-388

6.15- Gueymard C., Detuncq B. et Galanis N., 1982. Données de base pour le design simplifié des systèmes à énergie solaire au Québec. Rapport technique.MEC 82/2. Univ. de Sherbrooke

CHAPITRE 7 - ÉVALUATION DES MODÈLES DE CONVERSION DES VALEURS JOURNALIÈRES MOYENNES DE RAYONNEMENT EN VALEURS HORAIRES MOYENNES À LONG TERME

7.1 Introduction

Dans la plupart des problèmes d'ingénierie solaire, il est nécessaire de connaître les valeurs horaires du rayonnement incident sur le système de captage. Dans de nombreux cas cependant, il n'est ni nécessaire ni souhaitable de recourir à des valeurs horaires particulières (dont certains modèles de calcul ont fait l'objet des chapitres 3 et 4). Des méthodes de design ou de simulation simple se contentent en effet de considérer les variations moyennes à long terme de l'irradiance solaire pendant une journée typique.

La première tentative d'obtenir par une formulation simple de telles données horaires synthétiques remonte à 1953, alors que Whillier [7.1] présentait la méthode de «l'utilisabilité» visant à déterminer analytiquement la performance de capteurs solaires actifs. Partant du principe qu'on dispose plus souvent de données journalières moyennes plutôt que de données horaires, Whillier proposait une équation permettant de répartir l'irradiation globale pour la journée typique d'un mois entre les différentes heures du jour.

Une nouvelle analyse a été fournie par Liu et Jordan [7.2] en montrant que la formulation obtenue par Whillier pour le rayonnement global s'appliquait en fait plus précisément au rayonnement diffus. Tous ces auteurs relevaient en effet des déviations systématiques entre les données mesurées et les valeurs prédites par la méthode pour le rayonnement global.

Le concept d'utilisabilité a continué d'évoluer, et on peut trouver une discussion complète de cette méthode, ainsi que de la méthode du «$\bar{\phi}$, f chart» – qui en dérive par combinaison avec le f-chart– , à la référence [7.3].

Ces méthodes de design relativement élaborées devenant très accessibles aux ingénieurs, il devient important de savoir avec quelle précision les données de rayonnement horaire moyen peuvent être obtenues.

Une étude récente d'Iqbal [7.4] portant sur quelques stations canadiennes montrait à ce niveau une bonne concordance entre valeurs mesurées moyennes et valeurs prédites par la méthode de Liu et Jordan. Cependant, ces résultats ne se présentaient que sous forme graphique, sans donner d'évaluation quantitative de l'exactitude de la méthode.

Il s'avère donc intéressant de compléter cette première indication d'autant que d'autres formulations empiriques ont été apportées après Liu et Jordan pour améliorer la concordance entre le modèle initial et les mesures de rayonnement global horaire.

Comme mentionné au chapitre 2, les modèles étudiés ici peuvent être catalogués dans la colonne 13 de notre classification. On notera qu'à la connaissance des auteurs, il n'existe pas d'autres modèles de ce type dans la littérature en dehors de ceux analysés ici, ce qui fait de ce chapitre une étude vraiment exhaustive de la question.

7.2 Description des modèles

Dans toute la suite, on utilisera les notations suivantes déjà adoptées par certains auteurs:

$$\bar{r}_T = \frac{\bar{I}}{\bar{H}}, \text{ soit } \bar{I} = \bar{r}_T \bar{H} \qquad (7.1)$$

$$\bar{r}_d = \frac{\bar{I}_d}{\bar{H}_d}, \text{ soit } \bar{I}_d = \bar{r}_d \bar{H}_d \qquad (7.2)$$

où $\bar{I}$ et $\bar{I}_d$ sont respectivement les irradiations globale et diffuse pour une heure de la journée moyenne d'un mois, et où $\bar{H}$ et $\bar{H}_d$ sont les irradiations globale et diffuse pour toute la durée de cette journée moyenne à long terme.

Autrement dit,

$$\bar{H} = \sum_{-\omega_o}^{\omega_o} \bar{I}\,(\omega) \quad \text{et} \quad \bar{H}_d = \sum_{-\omega_o}^{\omega_o} \bar{I}_d\,(\omega)$$

où ω est l'angle horaire, variant entre $-\omega_o$ (lever du soleil) et $+\omega_o$ (coucher). $\bar{H}$ et $\bar{H}_d$ peuvent être des valeurs mesurées, ou calculées au moyen des modèles disponibles, par exemple, ceux présentés au chapitre 6. On rappelle que l'angle horaire ω varie de $\frac{\pi}{12}$ rad = 15° par heure, et est nul lorsque le soleil passe au méridien (midi vrai).

7.2.1 Modèle de Whillier

Dans sa thèse [7.1], Whillier proposait de calculer le rapport r_T entre les valeurs horaires et journalières de l'irradiation globale moyenne par:

$$\bar{r}_T = \frac{\pi}{24} \frac{\frac{24}{\pi} \sin\frac{\pi}{24} \cos\omega - \cos\omega_o}{\sin\omega_o - \omega_o \cos\omega_o} \qquad (7.3)$$

avec $$\cos\omega_o = -\tan\phi \tan\delta \qquad (7.4)$$

ω_o étant exprimé ici en radians, ϕ étant la latitude et δ la déclinaison (donnée au tableau 5.1).

L'équation (7.3) est obtenue en supposant que la transmittance globale de l'atmosphère est constante au cours de la journée typique du mois, hypothèse qui ne s'est révélée qu'approximative.

En effet, la série de valeurs de $\bar{r}_T$ calculées d'après des données mesurées montrait un écart plus ou moins systématique par rapport aux valeurs calculées par (7.3).

Le facteur $\bar{r}_T$ est seulement fonction de ω_o pour ω fixé. Or pour une période horaire donnée (par exemple 13-14h), on peut définir un ω moyen représentatif de cette période. C'est en l'occurrence le ω calculé pour le milieu de la période horaire (13h30 pour l'exemple, soit midi + 1.5 heure, d'où ω = 22.5 deg.).

7.2.2 Modèle de Liu et Jordan

En supposant que la transmittance de l'atmosphère pour le rayonnement diffus seul était constante pendant la journée typique du mois, Liu et Jordan [7.2] ont obtenu l'expression suivante pour le calcul de l'irradiance diffuse horaire moyenne:

$$\bar{r}_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos\omega_o - \cos\omega_b}{\sin\omega_o - \omega_o \cos\omega_o} \qquad (7.5)$$

avec une bonne concordance entre les valeurs ainsi calculées et les valeurs mesurées à Blue Hill (Mass.) et Helsingfors (Finlande).

On notera que les formules (7.3) et (7.5) sont équivalentes car le facteur $\frac{24}{\pi} \sin\frac{\pi}{24}$ qui apparaît dans la formule (7.3) a pour valeur 0.9971, ce qui est très proche de 1.

Tout comme Whillier avant eux, Liu et Jordan ont constaté que ce modèle introduisait des écarts sensibles lorsqu'appliqué au rayonnement global. Ces auteurs ont donc proposé une modification pour le calcul de $\bar{r}_T$, mais sous forme graphique seulement, à partir de données rassemblées par Whillier (voir figure 7.1).

7.2.3 Modèle de Klein

Reprenant directement la présentation graphique des données donnant $\bar{r}_T$ à partir des mesures rassemblées par Liu et Jordan, Klein [7.6] en a tiré une fonction analytique par lissage polynomial:

$$\bar{r}_T = A_i + B_i t_o + C_i t_o^2 + D_i t_o^3 \qquad (7.6)$$

avec $$t_o = 2\omega_o / 15 \qquad (7.7)$$

A_i, B_i, C_i et D_i sont des paramètres dont les valeurs sont obtenues numériquement, en fonction de l'angle horaire ω. Ces valeurs sont reproduites au tableau 7.1 par commodité. On remarquera que ces valeurs sont limitées au domaine $|\omega| < 97.5$ deg. (correspondant à 5h30 ou 18h30). Aucune information n'est donc disponible pour les fortes latitudes où le soleil peut se lever en été bien avant 5 heures Par exemple en juin, où la déclinaison est maximum, ce modèle ne donne pas d'indication pour la première heure dès que $\phi > 49.7$ deg., ou pour les deux premières heures dès que $\phi > 59$ deg., etc.

Cette limitation est cependant relativement peu gênante dans la plupart des cas puisque la contribution des premières heures du jour (pendant que le soleil est très bas sur l'horizon) est faible.

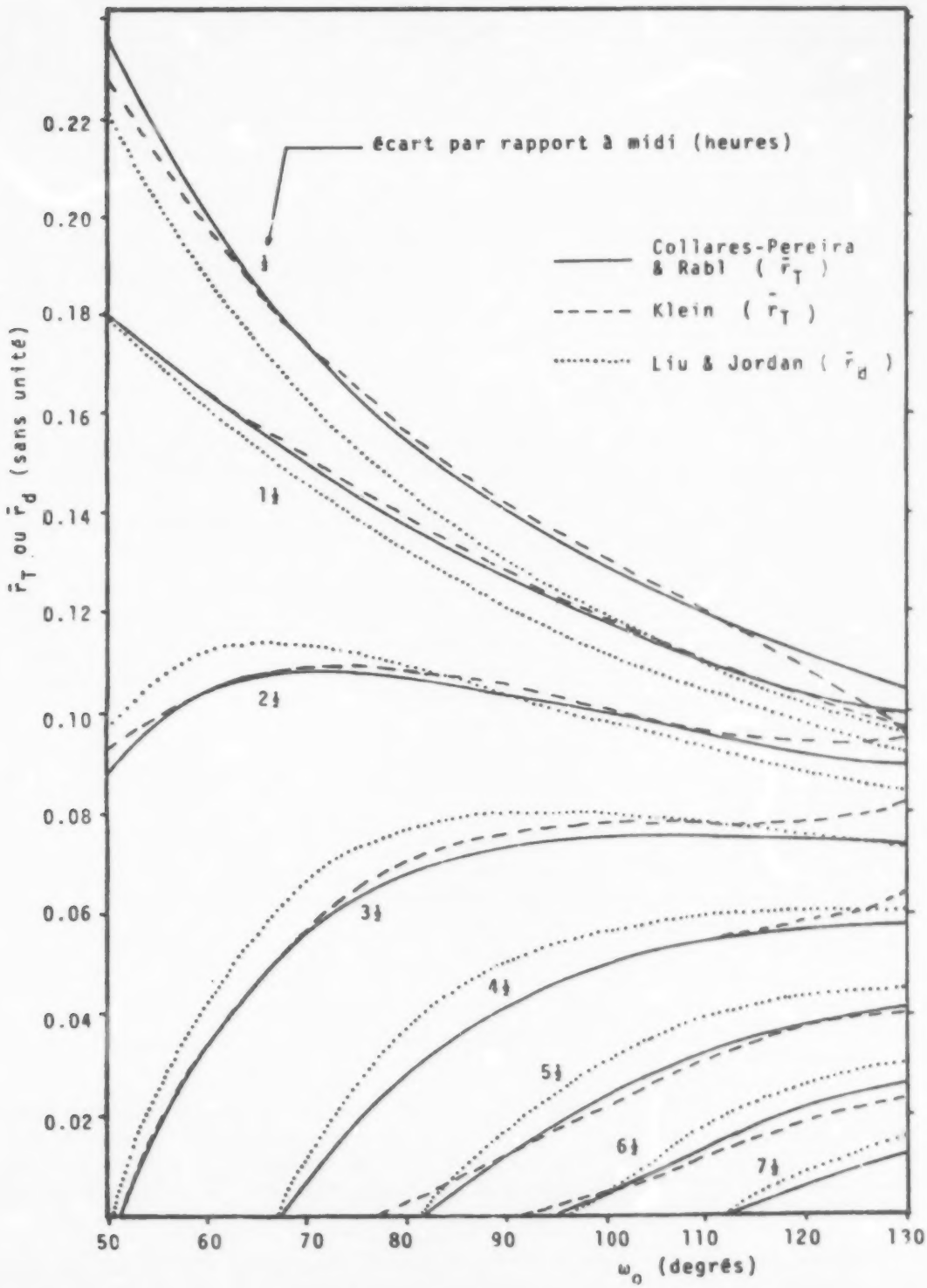


Figure 7.1 - Répartition horaire des irradiations journalières selon trois modèles.

TABLEAU 7.1 - Coefficients pour la relation (7.6)

Période horaire	$\lvert\omega\rvert$ (degrés)	A_i	$B_i \times 10^2$	$C_i \times 10^3$	$D_i \times 10^5$
11.5/12.5	7.5	0.5246	-6.767	4.112	-9.429
10.5/13.5	22.5	0.2986	-2.283	0.881	-1.359
9.5/14.5	37.5	-0.1225	5.828	-4.703	11.911
8.5/15.5	52.5	-0.4497	11.095	-7.761	18.056
7.5/16.5	67.5	-0.5213	10.793	-6.911	15.185
6.5/17.5	82.5	0.2081	-5.871	5.103	-13.126
5.5/18.5	97.5	0.2463	-5.900	4.419	-10.146

TABLEAU 7.2 - Résultats récapitulatifs pour le modèle de Liu et Jordan. Erreurs RMS et EMT en % de $\overline{r}_d$ mesuré moyen

Heure / Station		11.5/12.5	10.5/13.5	9.5/14.5	8.5/15.5	7.5/16.5	6.5/17.5
Montréal	RMS	3.0	1.7	2.6	5.9	11.7	10.5
	EMT	-2.7	-1.4	+1.2	+4.6	+3.0	+0.9
	$\overline{r}_d$	0.1382	0.1255	0.1018	0.0706	0.0389	0.0218
Toronto	RMS	3.4	1.8	2.4	6.3	8.8	9.4
	EMT	-2.3	-1.4	+1.0	+4.7	+1.5	-0.4
	$\overline{r}_d$	0.1369	0.1251	0.1016	0.0714	0.0397	0.0219
Goose Bay	RMS	4.1	2.9	3.2	6.7	10.8	15.2
	EMT	-3.3	-1.9	+1.5	+3.2	+5.1	+9.5
	$\overline{r}_d$	0.1436	0.1285	0.0999	0.0646	0.0389	0.0241
Moyenne	RMS	3.5	2.2	2.7	6.3	10.5	11.0
	EMT	-2.8	-1.6	+1.2	+4.2	+3.1	+3.3
	$\overline{r}_d$	0.1396	0.1264	0.1011	0.0689	0.0392	0.0225

7.2.4 Modèle de Collares-Pereira et Rabl

En se basant sur une analyse des données mesurées à cinq stations américaines, Collares-Pereira et Rabl [7.7] ont confirmé le bon comportement du modèle de Liu et Jordan appliqué au rayonnement diffus.

Par contre, l'application de la relation (7.3) pour le rayonnement global était une nouvelle fois jugée imprécise, et un lissage des données mesurées à ces stations leur a permis d'obtenir la formulation suivante:

$$\bar{r}_T = \frac{\pi}{24} \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \omega_s \cos\omega_s} (a + b \cos\omega) \qquad (7.8)$$

avec

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 1.047) \qquad (7.9)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 1.047) \qquad (7.10)$$

pour des angles en radians.

La relation (7.8) peut se combiner avec (7.5) pour donner:

$$\bar{r}_T = (a + b \cos\omega)\, \bar{r}_d \qquad (7.11)$$

Sous cette forme, on peut déjà constater que ce modèle correspond plus à la réalité physique que celui de Klein, dont l'équation (7.6) est purement empirique. En effet, $\bar{r}_T$ doit tenir compte de la variation de la transmittance du rayonnement direct pendant la journée, qui dépend elle-même de la hauteur solaire, donc de ω.

Par commodité, la représentation graphique des équations (7.5), (7.6) et (7.8) apparaît à la figure 7.1, sous la forme originellement introduite par Whillier [7.1] et reprise par tous ses successeurs.

7.3 Méthode d'évaluation

Les données horaires à long terme ont été relevées dans les tables de normales de rayonnement [7.8] pour les stations de Montréal, Goose Bay et Toronto.

Les valeurs horaires de $\bar{I}$ et $\bar{I}_d$ ont ensuite été assemblées par paires (la période 11-12h étant regroupée avec la période équivalente, soit 12-13h, etc.) en respectant la symétrie par rapport à midi. Les moyennes horaires ont alors été obtenues, et se sont avérées très proches des valeurs horaires des périodes individuelles considérées. Cela confirme les résultats d'Iqbal [7.4] qui n'avait pas décelé de disymétrie significative entre le matin et le soir pour les données de ces stations. Il n'en serait pas de même par contre pour des stations où règnent des influences microclimatiques particulières (proximité de la mer, d'un grand lac, de montagnes, d'une grande source de pollution, par exemple). De tels phénomènes de forte disymétrie ont par exemple été décelés pour Vancouver [7.4] et pour deux villes cotières d'Afrique du Sud [7.5].

Les rapports $\bar{r}_t$ et $\bar{r}_d$ obtenus à partir des valeurs mesurées de $\bar{I}$, $\bar{H}$, $\bar{I}_d$, $\bar{H}_d$ ont ensuite été comparés aux valeurs calculées à partir des différents modèles.

Les erreurs moyennes de tendance (EMT) et quadratiques moyennes (RMS) ont ensuite été calculées sur l'ensemble des douze valeurs mensuelles pour chaque période horaire.

En tenant compte des considérations théoriques données précédemment, et de l'approche commune aux différents modèles, on a limité l'analyse au modèle de Liu et Jordan pour le calcul de $\overline{r}_d$, et à ceux de Klein et Collares-Pereira et Rabl pour le calcul de $\overline{r}_T$.

7.4 Résultats et discussion

Les résultats pour le modèle de Liu et Jordan appliqué au calcul de $\overline{r}_d$ sont donnés au tableau 7.2.

Les résultats pour le calcul de $\overline{r}_T$ à partir du modèle de Klein et de celui de Collares-Pereira et Rabl sont donnés respectivement aux tableaux 7.3 et 7.4.

On peut constater immédiatement que les résultats d'ensemble sont excellents pour tous ces modèles, confirmant ainsi les conclusions qualitatives d'Iqbal [7.4]. On remarquera cependant que le calcul de $\overline{r}_d$ est plus imprécis que celui de $\overline{r}_T$, ce qui peut s'expliquer par le fait que la relation (7.5) est basée sur l'hypothèse que la transmittance diffuse de l'atmosphère est constante pendant la journée type. Il serait donc possible de raffiner la relation (7.5) en introduisant une fonction de ω, comme Collares-Pereira et Rabl ont fait pour obtenir (7.11).

Les résultats des tableaux 7.3 et 7.4 permettent difficilement de départager les modèles de Klein et de Collares-Pereira et Rabl, puisque leurs performances sont presque identiques, et à toute fin pratique équivalentes. Cela n'est d'ailleurs pas étonnant puisque les deux modèles reposent au moins en partie sur les données de Liu et Jordan (et en totalité pour celui de Klein). Aussi, la différence entre les deux modèles ne ressort-elle pas de façon évidente à la figure 7.1. Cependant, on peut y déceler une tendance à la dérive du modèle de Klein pour $\omega_o < 60$ deg. et $\omega_o > 120$ deg., ce qui provient du fait que les courbes de Liu et Jordan qui ont été lissées analytiquement par Klein ne couvraient que l'intervalle 60 à 120 degrés. Ainsi le modèle de Kelin aurait une tendance à l'imprécision pour des latitudes d'au moins 50 ou 55 degrés. Goose Bay est ainsi encore dans la zone de bonne précision, l'effet de dérive ne se faisant sentir que légèrement en juin(ω_o = 124.7 deg.) et décembre (ω_o = 55.3 deg.).

Si en plus de ces considérations, on tient compte du critère de simplicité d'utilisation, il devient plus aisé de recommander le modèle de Collares-Pereira et Rabl.

À ces premières analyses, on peut ajouter que les résultats heure par heure mettent en évidence l'étonnante moindre précision obtenue pendant la période située la plus proche de midi — soit la paire 11-12/12-13. En effet, la période 10-11/13-14 s'avère de manière très systématique

TABLEAU 7.3 - Résultats récapitulatifs pour le modèle de Klein
Erreurs RMS et EMT en % de $\overline{r}_T$ mesuré moyen

Station \ Heure		11.5/12.5	10.5/13.5	9.5/14.5	8.5/15.5	7.5/16.5	6.5/17.5
Montréal	RMS	1.9	0.8	0.7	2.7	6.9	6.4
	EMT	+0.6	+0.2	+0	+2.2	-3.4	-3.3
	$\overline{r}_T$	0.1444	0.1297	0.1029	0.0678	0.0353	0.0181
Toronto	RMS	2.8	1.3	1.0	2.4	6.5	8.0
	EMT	+1.8	+0.3	+0.1	+0.9	-4.6	-5.6
	$\overline{r}_T$	0.1423	0.1293	0.1032	0.0695	0.0363	0.0181
Goose Bay	RMS	1.8	1.1	2.0	3.5	5.9	5.4
	EMT	+0.1	+0	+1.0	+2.0	+2.5	+0.9
	$\overline{r}_T$	0.1482	0.1315	0.1001	0.0625	0.0401	0.0213
Moyenne	RMS	2.2	1.1	1.3	2.9	6.4	6.6
	EMT	+0.8	+0.2	+0.4	+1.7	-1.7	-2.5
	$\overline{r}_T$	0.1450	0.1302	0.1021	0.0666	0.0371	0.0191

TABLEAU 7.4 - Résultats récapitulatifs pour le modèle de Collares-Pereira et Rabl. Erreurs RMS et EMT en % de $\overline{r}_T$ mesuré moyen.

Station \ Heure		11.5/12.5	10.5/13.5	9.5/14.5	8.5/15.5	7.5/16.5	6.5/17.5
Montréal	RMS	1.2	0.8	1.6	3.4	7.1	7.7
	EMT	+0.2	-0.2	-0.9	-0.1	-3.4	-0.6
	$\overline{r}_T$	0.1444	0.1297	0.1029	0.0678	0.0353	0.0181
Toronto	RMS	2.4	1.5	1.5	3.6	7.0	6.9
	EMT	+1.3	-0.1	-1.0	-1.4	-4.7	-3.0
	$\overline{r}_T$	0.1423	0.1293	0.1032	0.0695	0.0363	0.0181
Goose Bay	RMS	1.0	0.8	2.3	3.7	4.6	8.4
	EMT	+0.7	+0	-0	-1.4	-1.2	3.4
	$\overline{r}_T$	0.1482	0.1315	0.1001	0.0625	0.0401	0.0213
Moyenne	RMS	1.6	1.1	1.8	3.6	6.3	7.8
	EMT	+0.7	-0.1	-0.6	-1.0	-3.2	+0
	$\overline{r}_T$	0.1450	0.1302	0.1021	0.0666	0.0371	0.0191

TABLEAU 7.5 - Précision des modèles de Liu et Jordan, Klein, et Collares-Pereira et Rabl, pour les heures 7.5/16.5 et 6.5/17.5 en considérant seulement les valeurs de $\bar{r}_d$ et $\bar{r}_T$ supérieures à 0.025

Heure		7.5/16.5			6.5/17.5		
Modèle		Liu & Jordan	Klein	Collares-P. & Rabl	Liu & Jordan	Klein	Collares-P. & Rabl
	RMS	8.1	2.2	2.3	5.5	4.3	3.1
Montréal	EMT	+6.8	-0.6	-0.9	+5.2	-2.1	+2.4
$[\bar{r}_T]$	$\bar{r}_d$	0.0489	[0.0477]	[0.0477]	0.0355	[0.0318]	[0.0318]
	RMS	5.9	3.1	3.4	3.4	4.9	0.8
Toronto	EMT	+4.3	-2.4	-2.5	+2.5	-4.6	+0.6
$[\bar{r}_T]$	$\bar{r}_d$	0.0494	[0.0483]	[0.0483]	0.0357	[0.0316]	[0.0316]
	RMS	8.6	3.8	1.6	12.0	4.4	6.1
Goose Bay	EMT	+8.3	+2.2	+0.4	+11.8	+2.6	+5.9
$[\bar{r}_T]$	$\bar{r}_d$	0.0499	[0.0509]	[0.0509]	0.0362	[0.0327]	[0.0327]
	RMS	7.6	3.1	2.6	7.9	4.5	4.2
Moyenne	EMT	+6.4	-0.3	-1.0	+6.5	-1.0	+3.2
$[\bar{r}_T]$	$\bar{r}_d$	0.0494	[0.0489]	[0.0489]	0.0358	[0.0321]	[0.0321]

être celle qui obtient le meilleur score, suivie de près par la période 9-10/14-15.

Pour ces trois périodes horaires — les plus importantes du point de vue du captage du rayonnement— l'erreur RMS ne dépasse pas 3% pour $\bar{r}_T$, ce qui est vraiment remarquable.

La précision se détériore nettement pour les périodes plus éloignées de midi, mais cela n'est pas nécessairement grave dans la mesure où le rayonnement incident est alors souvent trop faible pour activer efficacement les systèmes de chauffage solaire.

Si on restreint l'analyse aux périodes pour lesquelles les valeurs mesurées de $\bar{r}_d$ et $\bar{r}_T$ sont supérieures à 0.025 (valeur qui équivaut à un seuil de 5% de $\bar{H}_d$ ou $\bar{H}$ pour la paire horaire correspondante, ce qui d'octobre à février au moins peut correspondre sensiblement au seuil de fonctionnement des capteurs actifs ordinaires au Québec), la précision du calcul s'améliore nettement, comme on peut le constater en comparant les tableaux 7.2, 7.3, 7.4 au tableau 7.5.

L'excellence de ces résultats pour les stations de Montréal, Toronto et Goose Bay incite à juger inutile la poursuite de l'analyse pour d'autres stations, comme les cinq envisagées aux chapitres 5 et 6. On peut d'ailleurs ajouter que ces stations mesurent seulement le rayonnement global, qui pose encore moins de problèmes de modélisation que le diffus comme on l'a vu, et que la base semi-physique des modèles permet de supposer qu'ils restent valables pour différents types de climat.

Enfin, ajoutons que la précision des modèles ainsi évaluée est très proche de leur précision absolue, puisque les erreurs instrumentales systématiques qui peuvent toujours exister pour une station donnée (par exemple, l'oubli de la correction d'ombrage dans les données de rayonnement diffus de Liu et Jordan) se trouvent corrigées en grande partie, sinon en totalité, par le simple fait de considérer des rapports adimensionnels de grandeurs mesurées de façon identique ($\bar{I}_d/\bar{H}_d$ et $\bar{I}/\bar{H}$).

7.5 Conclusion

Le type de modèle analysé dans ce chapitre s'accompagne de résultats particulièrement précis, consistants et indépendants des variations climatiques.

Ceci vient confirmer et élargir les conclusions de l'analyse qualitative d'Iqbal [7.4], et l'on peut maintenant considérer que les modèles de calcul de $\bar{r}_d$ et $\bar{r}_T$ ont atteint le stade de la quasi-perfection, quoique le calcul de $\bar{r}_d$ pourrait être encore légèrement amélioré.

Pour la période de six heures centrées sur midi, l'erreur RMS sur $\bar{r}_d$ ne dépasse pas 3.5% sur l'ensemble des trois stations étudiées (3% à Montréal), alors que dans les mêmes conditions, l'erreur RMS sur $\bar{r}_T$

est de l'ordre de 1 à 2% (en moyenne, ainsi qu'à Montréal). Pour ce dernier calcul, les deux modèles étudiés sont équivalents en précision, mais celui de Collares-Pereira et Rabl peut être considéré plus simple et plus versatile.

Les résultats remarquables ainsi obtenus ne sont cependant atteints qu'en partant de valeurs mesurées de $\overline{H}_d$ et $\overline{H}$. Dans le cas général où ces valeurs doivent être calculées (par exemple au moyen des modèles analysés au chapitre 6), on peut conclure que le calcul subséquent de $\overline{r}_d$ et $\overline{r}_T$ n'introduit pratiquement pas d'imprécision supplémentaire à celle résultant de l'estimation de $\overline{H}_d$ et $\overline{H}$, puisque les erreurs RMS enregistrées ont environ un ordre de grandeur d'écart.

7.6 Références

7.1- Whillier A., 1953. Solar energy collection and its utilization for house heating. D.Sc. Thesis, M.I.T. Cambridge (Réédité par Arno Press, New York, 1979)

7.2- Liu B.Y.H. et Jordan R.C., 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, 4: 1-12

7.3- Duffie J.A. et Beckman W.A., 1980. Solar engineering of thermal processes. Wiley, New York, 762 p.

7.4- Iqbal M., 1979. A study of Canadian diffuse and total solar radiation data, pt. 2. Solar Energy, 22: 87-90

7.5- Whillier A., 1956. The determination of hourly values of total solar radiation from daily summations. Arch. Met. Geoph. Biokl., 87: 197-204

7.6- Klein S.A., 1976. A design procedure for solar heating systems. Ph.D. Thesis University of Wisconsin, Madison.

7.7- Collares-Pereira M. et Rabl A., 1979. The average distribution of solar radiation – correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. Solar Energy, 22: 155-164

7.8- Phillips D.W. et Aston D., 1980. Données sur le rayonnement solaire au Canada. Environnement Canada CLI-2-80, Downsview, Ont.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Pour un concepteur de projet solaire, il est vital de pouvoir disposer, pour chaque site considéré, des données de rayonnement solaire aussi bien que d'autres types de données météorologiques ou climatiques. Considérant la grave pénurie en mesures routinières de rayonnement, qui est malheureusement totale en ce qui concerne le problème crucial des plans inclinés, le recours à des modèles suffisamment précis pour le calcul du rayonnement devient une nécessité.

De nombreux modèles ayant été proposés dans la littérature pour répondre à des besoins très différents, il est apparu nécessaire de procéder à un premier inventaire et de proposer une méthode de classification originale permettant un choix éclairé du modèle approprié en fonction des données disponibles et de l'utilisation envisagée. A l'intérieur de la grille de classification ainsi obtenue, cinq types de modèles ont été sélectionnés comme couvrant un éventail des applications les plus fréquentes en matière d'énergie solaire. La difficulté des calculs impliqués couvre donc également une large gamme. On retrouve ainsi aux chapitres 3 et 4 des calculs horaires nécessitant le traitement par ordinateur en vue des études de simulation thermique; par contre, les chapitres 5, 6 et 7 sont concernés par des calculs plus simples, opérables avec une simple calculatrice de poche, et en correspondance avec les méthodes de design des systèmes solaires.

Cette variété dans le choix des modèles est volontaire; à la connaissance des auteurs, ceci constitue d'ailleurs la première étude de ce type et d'une telle envergure entreprise dans un cadre géoclimatique limité. Le résultat des évaluations statistiques qui ont été entreprises devrait ainsi répondre en grande partie aux attentes des intervenants québécois, tel qu'il ressort de l'enquête effectuée auprès d'eux en 1980 (annexe 2).

En résumé, les principales recommandations sont les suivantes:

1. Le manque actuel de données de base sur le rayonnement solaire étant préjudiciable à la qualité des conceptions utilisant l'énergie solaire, l'implantation de nouvelles stations pour la mesure de routine du rayonnement devrait être instituée à brève échéance; en particulier, il serait nécessaire de disposer de telles mesures sur des plans inclinés le plus rapidement possible.

2. Les rubans contenant les observations météorologiques horaires et les mesures de rayonnement solaire ne sont pas utilisables directement tels que fournis par Environnement Canada pour les applications énergétiques nécessitant l'ordinateur. Un autre format séquentiel permettant une utilisation immédiate dans les programmes de simulation thermique décrit au chapitre 1 est donc préconisé. Les rubans contenant ces informations suivant le format du tableau 1.7 pour les stations de Montréal, Normandin, Sept-Iles, Goose Bay et Ottawa ont été remis au Service de la Météorologie du Québec, auprès de qui ils peuvent être obtenus pour fin de recherche.

3. La classification proposée au chapitre 2 (tableau 2.1) devrait être utilisée par ceux qui développent de nouveaux modèles de façon à faciliter

le choix des utilisateurs.

4. Les modèles horaires permettant le calcul des différentes composantes du rayonnement à partir des observations météorologiques devraient incorporer des algorithmes plus physiques qu'empiriques de manière à tendre vers une meilleure précision, qui est à l'heure actuelle peu satisfaisante. En particulier, le modèle de l'ASHRAE, testé au chapitre 3, ne semble pas convenir à une utilisation au Canada, et le modèle de Won devrait lui être préféré. De plus, les résultats de simulations thermiques effectuées sur des bâtiments solaires en utilisant le modèle de l'ASHRAE sont particulièrement sujets à caution.

5. Le calcul horaire du rayonnement diffus peut en général être fait avec plus de précision avec un modèle de séparation diffus/direct (lorsque le rayonnement global est mesuré) qu'avec le meilleur modèle décrit au point précédent. Ainsi, le chapitre 4 montre que l'emploi du modèle d'Orgill & Hollands (tel qu'utilisé dans le programme WATSUN) est nettement préférable à ceux de Won et de Liu & Jordan (du programme TRNSYS) dans les conditions climatiques du Québec. Ce dernier introduit en effet une forte sous-estimation du rayonnement diffus. Il resterait a améliorer le modèle d'Orgill & Hollands pour éviter la sous-estimation relevée pendant l'hiver, surtout en climat nordique nuageux.

6. Les mises en garde qui viennent d'être relevées aux points 4 et 5 justifient la poursuite d'études d'évaluation ayant pour but de quantifier la précision des résultats thermiques (par exemple l'efficacité des systèmes solaires, la contribution des gains solaires à la charge thermique des bâtiments...) obtenus avec des programmes de simulation.

7. De très nombreux modèles ont été proposés pour le calcul du rayonnement à partir de la durée d'insolation. Ils conviennent particulièrement bien à la détermination des données nécessaires aux méthodes simplifiées de design (f-chart par exemple). Les chapitres 5 et 6 couvrent deux types d'application possibles de ces modèles, d'où il ressort que les corrélations empiriques les plus simples (de type Kimball-Angström-Page) ont un comportement qui répond difficilement au climat local. De meilleures performances pour l'est du Canada ont été obtenues avec les modèles de Gariépy et Hay (pour le rayonnement global). La séparation des composantes diffuse et directe peut être réalisée par des corrélations simples (Gueymard et al. ou Iqbal suivant les cas).

8. La répartition horaire des valeurs journalières moyennes est abordée au chapitre 7. La précision de ce type de modèles s'avère excellente; elle permet donc une utilisation combinée avec les modèles recommandés au point 7 pour générer les données nécessaires aux méthodes de design basées sur l'utilisabilité du rayonnement.

9. D'une manière générale, les modèles de calcul du rayonnement ne devraient pas être interprétés ou modifiés. En particulier, la réduction temporelle préalablement subie par les données d'entrée joue un rôle important comme il a été relevé aux chapitres 4 et 5 à propos des modèles de Liu & Jordan et de Rietveld. De même, les combinaisons arbitraires de modèles peuvent entraîner des résultats corrects ou médiocres suivant les compensations possibles, et devraient donc être évitées tant que des études comme celle-ci ne les auront pas validées.

10. En dehors des modèles évalués au chapitre 7, les meilleurs modèles testés dans les différentes catégories présentent encore des lacunes se traduisant par des fluctuations de précision parfois importantes, éventuellement saisonnières ou latitudinales. Des recherches devraient être poursuivies pour obtenir des modèles plus fiables (c'est à dire dont le domaine de validité s'étend à plusieurs types de climat, avec une précision relativement constante), aussi bien dans la catégorie des modèles horaires (basés sur les observations météorologiques) que des modèles plus simples (basés sur la durée d'insolation).

ANNEXE 1 - RECAPITULATION DES EQUATIONS POUR LES MODELES DE CALCUL HORAIRE DU RAYONNEMENT SUR UN PLAN HORIZONTAL.

Note: Toutes les heures sont supposées fournies en temps solaire vrai (ou temps local apparent), les angles sont en radians et les irradiations horaires sont calculées en MJ m^{-2}.

A1.1 Modèle ASHRAE

Paramètres : ϕ (latitude), C_N (facteur de clarté), a, b, c (coefficient de nébulosité donnés au tableau A1)

Variables : M (mois), J (quantième de l'année), H (heure locale)
N_{et} (étendue totale), $\sum_{cirr.} N_{ei}$ (étendue des cirriformes)

Calculs astronomiques

$$\theta_j = 2 \pi J / 366$$

$$\delta = 0.302 - 22.93 \cos \theta_j + 3.851 \sin \theta_j - 0.229 \cos 2 \theta_j + 0.002 \sin 2 \theta_j$$
$$- 0.243 \cos 3 \theta_j - 0.055 \sin 3 \theta_j$$

$$\omega = \pi (H - 12) / 12$$

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$$

Facteurs de transmission

$$A = 0.011349 [368.44 + 24.52 \cos \theta_j + 0.58 \sin \theta_j - 1.14 \cos 2 \theta_j$$
$$+ 0.28 \sin 3 \theta_j) - 1.09 \cos 3 \theta_j + 0.28 \sin 3 \theta_j$$

$$B = 0.1717 - 0.0344 \cos \theta_j - 0.043 \sin \theta_j + 0.0032 \cos 2 \theta_j$$
$$+ 0.0024 \cos 3 \theta_j - 0.0008 \sin 3 \theta_j$$

$$C = 0.0905 - 0.041 \cos \theta_j - 0.0034 \sin \theta_j + 0.0073 \cos 2 \theta_j$$
$$+ 0.0004 \sin 2 \theta_j + 0.0015 \cos 3 \theta_j - 0.0006 \sin 3 \theta_j$$

Irradiations par ciel clair

$$I_n^* = A C_N \exp (- B / \sin h)$$

$$I_d^* = C I_n^* / C_N^2$$

$$I_b^* = I_n^* \sin h$$

$$I^* = I_b^* + I_d^*$$

Irradiations effectives

$Y = 0.309 - 0.137 \sin h + 0.394 \sin^2 h$

$K = [\sin h / (C + \sin h)] + [(a - 1) / (1 - Y)]$

$N_{ct} = N_{et} - 0.5 \sum_{cirr.} N_{ei}$

$F_c = a + b N_{ct} + c N_{ct}^2$

$I_b = K I^* (1 - N_{ct})$

$I_d = I^* [F_c - K (1 - N_{ct})]$

$I = I_b + I_d$

a, b, c donnés au tableau A1.

A1.2 Modèle Won

Paramètres : ϕ (latitude), a, b, c et d (coefficients régionaux mensuels, donnés au tableau A2)

Variables : J (quantième de l'année), M (mois), H (heure locale), N_{pt} (opacité totale), p (pression à la station, mbar) T_{dp} (température du point de rosée, °C)

Calculs astronomiques

$\theta = 2 \pi J / 365$

$\delta = 0.3964 + 3.631 \sin \theta'_j - 22.97 \cos \theta'_j + 0.03838 \sin 2 \theta'_j - 0.3885 \cos 2 \theta'_j + 0.07659 \sin 3 \theta'_j - 0.1587 \cos 3 \theta'_j - 0.01021 \cos 4 \theta'_j$

$r = 1 - 0.0009464 \sin \theta'_j - 0.01671 \cos \theta'_j - 0.0001489 \cos 2 \theta'_j - 0.00002917 \sin 3 \theta'_j - 0.0003438 \cos 4 \theta'_j$

$\omega = \pi (H - 12) / 12$

$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$

$m = 35 / \sqrt{1224 \sin^2 h + 1}$

$I_o = 4.8725 \, r^2 \sin h$

Facteurs de transmission

$t_R = \exp(-0.000496\ (pm)^{0.75})$

$w = \exp(2.2572 + 0.05454\ T_{dp})$

$t_w = \exp(-0.0288\ (wm)^{0.6})$

$t_a = \exp(-0.083\ (dm)^{0.9})$

$F_c = a + b\ N_{pt} + c\ N^2_{pt}$

a, b, c, et d donnés au tableau A2.

Irradiations par ciel clair

$I_b^* = t_a\ t_R\ t_w\ I_o$

$I^* = a\ I_b^*$

$I_d^* = I^* - I_b^*$

Irradiations effectives

$I_b = I_b^*\ (1 - N_{pt})$

$I = I_b^*\ F_c$

$I_d = I - I_b$

A1.3 Modèles de Liu & Jordan et Orgill & Hollands

Paramètres : ϕ (latitude)

Variables : J (jour), H (heure locale), I (irradiation globale horaire, MJ m^{-2})

Calculs astronomiques communs

$\theta'_j = 2\ \pi\ J\ /\ 365$

$S = \theta'_j + 4.8888$

$\delta = 23.45\ (\frac{\pi}{180})\ \sin S$

$\omega = \pi\ (H - 12)\ /\ 12$

$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$

$I_o = 4.871\ (1 + 0.033 \cos \theta'_j)\ \sin h$

Modèle Liu & Jordan (TRNSYS)

$K_T = I / I_o$

$I_d = \text{Max}\ [(1.0045 + 0.04349\ K_T - 3.5227\ K_T^2 + 2.6313\ K_T^3)\ I,\ 0.1657\ I]$

$I_b = \text{Max}\ (0,\ I - I_d)$

Modèle Orgill & Hollands (WATSUN)

$K_T = I / I_o$

$I_d = (1 - 0.248857\ K_T)\ I \qquad \text{pour}\ K_T < 0.35$

$I_d = (1.55699 - 1.840127\ K_T)\ I \qquad \text{pour}\ 0.35 < K_T < 0.75$

$I_d = 0.1769\ I \qquad \text{pour}\ K_T > 0.75$

$I_b = \text{Max}\ (0,\ I - I_d)$

Tableau A1 - Valeurs des coefficients a, b, c pour le modèle ASHRAE

Mois	a	b	c
Janvier-mars	1.06	0.12	-0.84
Avril-juin	0.96	0.33	-1.06
Juillet-septembre	0.95	0.30	-1.08
Octobre-décembre	1.14	0.03	-0.82

Tableau A2 - Valeurs des coefficients a, b, c, d pour le modèle Won

Région	Lacs Inférieurs				Maritimes			
Mois	a	b	c	d	a	b	c	d
1	1.2068	0.2235	-1.0109	0.6000	1.2886	0.1895	-1.1014	0.7900
2	1.1543	0.2381	-0.9481	0.5600	1.2425	0.3574	-1.1190	0.9599
3	1.1393	0.2818	-1.0353	0.9200	1.2112	0.3923	-1.1422	1.2600
4	1.0946	0.2822	-1.0861	1.1700	1.1499	0.5060	-1.2478	1.5200
5	1.0577	0.3826	-1.1529	1.3500	1.1094	0.4768	-1.2099	1.6300
6	1.0493	0.3968	-1.1512	1.3000	1.0617	0.6143	-1.3103	1.4600
7	1.0706	0.2965	-1.0276	1.4399	1.1207	0.5548	-1.2700	1.7600
8	1.0895	0.2925	-1.0548	1.2700	1.1027	0.5578	-1.2987	1.3000
9	1.0767	0.3292	-1.1235	0.8600	1.1383	0.5415	-1.3413	1.1099
10	1.1022	0.3838	-1.2153	0.8100	1.1328	0.5748	-1.3974	0.8799
11	1.1405	0.2430	-1.1150	0.5299	1.2204	0.3838	-1.2783	0.7599
12	1.2221	0.1451	-1.0081	0.5600	1.2655	0.2739	-1.1557	0.6800

ANNEXE 2 - ENQUETE RELATIVE AU RAYONNEMENT SOLAIRE AUPRES DES INTERVENANTS QUEBECOIS DANS LE DOMAINE DE L'ENERGIE SOLAIRE.

Un questionnaire a été envoyé en juillet 1980 auprès de tous les intervenants québécois en énergie solaire répertoriés par la Direction des énergies nouvelles.

Cette enquête avait pour but d'identifier les types d'application les plus fréquemment rencontrés par les intervenants, leurs besoins en matière de données sur le rayonnement solaire, ainsi que de mieux cerner les problèmes spécifiques d'utilisation des calculs de rayonnement solaire dans les domaines du design de systèmes thermiques et de la recherche.

L'énoncé de toutes les questions posées apparaît ci-après . Sur 106 questionnaires envoyés, 38 ont été retournés (entre juillet et décembre 1980), soit un taux de réponse de 36%.

La compilation des résultats pour chaque question, ainsi que les commentaires, seront présentés en premier, et seront suivis d'une synthèse (au paragraphe A2.2) et d'une conclusion (au paragraphe A2.3).

A2.1 Analyse détaillée des réponses du questionnaire

Question 1 - Quelle est votre occupation?

ingénieur	13
chercheur	7
chercheur-ingénieur	5
architecte	5
fabricant	3
administrateur . .	2
technologue	1
agent d'information	1
estimateur	1
	38

Une forte proportion de répondants (79%) oeuvre ainsi au niveau de la conception, du design et de la recherche.

Question 2 - Avez-vous déjà eu besoin d'informations générales sur le rayonnement solaire?

oui	36
non	2
	38

-Question 2a - Si oui, les avez-vous trouvées?

oui	36
non	2
	38

Question 3 - Avez-vous déjà eu besoin de données de rayonnement pour le Québec?

oui, fréquemment	21	} 35
oui, rarement	14	
non, jamais	2	
sans réponse	1	
	38	

-Question 3a - Si oui, les avez-vous trouvées?

oui, toujours	9
oui, parfois	23
non, jamais	3
	35

Il apparaît qu'un problème se situe soit au niveau de la diffusion des données existantes, soit au niveau d'un manque de données adéquates, soit à ces deux niveaux à la fois.

-Question 3b - De quels types de données avez-vous besoin?

rayonnement global	26	
rayonnement direct et/ou diffus	28	
valeurs instantanées	22	
valeurs cumulées	25	
plan horizontal	20	
plan incliné	27	
autres	7	
	155	(plusieurs réponses possibles)

Question 4 - Pour vos travaux, la valeur du rayonnement incident est-elle:

très importante	17
importante	14
peu importante	6
sans réponse	1
	38

Pour 82% des répondants, le rayonnement solaire intervient de façon importante (ou très importante) dans les projets solaires.

Question 5 - Avez-vous déjà fait un calcul de rayonnement incident?

oui	19
non	8
sans réponse	11
	38

Seulement la moitié des répondants s'est déjà astreinte à

un calcul d'estimation du rayonnement incident pour un système solaire. Par comparaison avec la question 4, on peut a priori en déduire qu'une bonne partie des répondants préfère utiliser des données tabulées ou cartographiées pour répondre à leurs besoins.

-Question 5a - Si oui, à partir de quelles données de base?

durée d'insolation	16	
ennuagement	12	
autres	3	
	31	(plusieurs réponses possibles)

Ceux qui recourent à des modèles de calcul font donc appel éventuellement à plusieurs types de données de base (donc de types de modèles différents) pour leurs besoins.

-Question 5b - Si oui, quel(s) modèle(s) avez-vous utilisé(s)?

ASHRAE (Stephenson)	4
ASHRAE (Absorbtance model)	3
Duffie & Beckman	3
Equation d'Angström	2
F.-chart (Klein & Duffie)	2
CIE diffuse luminance	1
Uniform dome for diffuse	1
Modèle de l'IREQ	1
Bilgen-Camous-Trombe	1
Coulson	1
Goldberg & Klein	1
	20

Plusieurs commentaires sont ici nécessaires: un seul répondant "oui" à la question 5 a déjà utilisé deux modèles différents, tous les autres répondants se contentant d'un seul modèle. Il faut noter que les répondants dénomment les modèles de manière assez vague le plus souvent. C'est la cas pour "l'Absorptance model" d'ASHRAE, l'équation d'Angström (voir discussion au chapitre 5), le modèle de l'IREQ (qui n'est pas publié), les modèles attribués à Duffie & Beckman et à Bilgen, Camous & Trombe (qui en fait réfèrent à des livres où plusieurs modèles différents sont décrits).

On peut espérer que le présent document permettra d'éclairer le choix des intervenants en matière de modèles de rayonnement.

On notera enfin l'utilisation prédominante du modèle de l'ASHRAE (ou de ses différentes versions, voir chapitre 3), ainsi que de modèles simples pour l'utilisation du f-chart.

-Question 5c - Si oui, pouvez-vous estimer la précision de ce calcul?

Précision ± 10%	2
± 30%	2
± 15%	1
± 2%	1
± 20%	1
Non (incapable d'établir une précision)	11
Pas de réponse	1
	19

et quelques commentaires ajoutés par les répondants.

Le peu de réponses à cette question peut refléter leur embarras dans la mesure où la précision des modèles de calcul est rarement connue, et est susceptible de varier de manière imprévisible selon les climats, les approximations, les périodes, les interprétations, etc. Le présent travail devrait permettre d'apporter un éclairage important à ce niveau en ce qui concerne le climat du Québec.

Question 6 - Utilisez-vous l'ordinateur?

très souvent	13
quelquefois	11
jamais	14
	38

-Question 6a - Si "jamais", trouveriez-vous intéressant de l'utiliser dans le cas où par ce moyen le calcul du rayonnement incident s'avérerait de bonne précision et peu coûteux?

oui	16
non	1
peut-être	1
	18

Bien que 4 répondants de trop aient malencontreusement répondu à cette question (puisqu'il ne devrait y avoir que 14 réponses ici), on peut noter l'éveil d'un intérêt certain pour l'utilisation de l'ordinateur pour la modélisation et le design solaire.

-Question 6b - Si "non", pourquoi?

Un seul intervenant a répondu "non": déplacements trop fréquents dans le cas d'un ordinateur puissant, préférence pour calculatrice programmable, sont ses commentaires.

Question 7 - Utilisez-vous une calculatrice programmable?

très souvent	8
quelquefois	13
jamais	15
sans réponse	2
	38

On remarque que 21 répondants utilisent au moins occasionnellement une calculatrice programmable, contre 24 l'ordinateur. Il y a évidemment plusieurs répondants qui utilisent ces deux outils parallèlement.

-Question 7a : comme question 6a

oui	19
non	2
	21

Le commentaire de la question 6a s'applique encore ici.

-Question 7b - Si "non", pourquoi?

Commentaires: la lenteur de ce moyen de calcul.

Question 8 - Utilisez-vous des programmes d'ordinateur de simulation thermique des bâtiments?

oui	11
non	25
sans réponse	2
	38

-Question 8a - Si "oui", le(s)quel(s)?

MERIWETHER	4
TRNSYS	3
ABC	2
CALMEC	2
ENCORE CANADA	2
BLAST	1
F-chart	1
LIB 3	1
NBSLD	1
SBEPE	1
SYSSYM	1
TEMPMASTER	1
ZEBEC	1
	21

13 programmes différents sont utilisés par 11 répondants, cer-

tains utilisant plusieurs programmes en parallèle. Il est surprenant de constater la faible représentativité des programmes canadiens: ENCORE CANADA n'est cité que par 2 répondants, WATSUN n'est pas cité du tout, CALMEC et SBEPE ont un seul répondant chacun, ce qui est malgré tout normal puisque ce sont des programmes "maison" de l'Hydro-Québec et l'IREQ, respectivement, non diffusés dans la communauté scientifique

Question 9 - Utilisez-vous des programmes de calculatrice programmable pour la simulation thermique des bâtiments?

oui	2
non	34
sans réponse	2
	38

On peut constater que le succès indéniable remporté aux Etats-Unis par les programmes de simulation pour calculatrice n'a pas (encore?) eu d'effet sur les intervenants québécois, même s'ils utilisent une calculatrice programmable (voir question 7).

-Question 9a - Si "oui", le(s)quel(s)?

programme personnel: 2 réponses

Question 10 - Avez-vous utilisé la méthode de design "f-chart" pour les systèmes de chauffage solaire?

oui	18
non	19
sans réponse	1
	38

Cette méthode de design peut être opérée à la main, sur calculatrice programmable et sur ordinateur, ce qui explique au moins en partie sa popularité.

Question 11 - Quelles informations générales souhaitez-vous voir figurer dans notre rapport?

De nombreux commentaires ayant été apportés à cette question, il serait fastidieux d'en donner la liste exhaustive. De manière synthétique, les réponses s'articulent suivant quelques grands thèmes:

- définitions générales, équations pour le calcul des coordonnées solaires, notions de base sur le rayonnement

- calcul facile du rayonnement, suggestions de modèles pour applications courantes

- information sur les programmes (ordinateur, calculatrice) existants

- évaluation de l'énergie solaire au Québec (ou pour les régions métropolitaines seulement), information sur les données météorologiques existantes

- comparaison et évaluation de différents modèles appropriés, précision possible des calculs, suggestions concernant la meilleure application de chaque modèle

- information scientifique complète avec nombreuses références

- problèmes particuliers: effet d'un terrassement autour d'une maison, effet de la réflexion sur la neige, demande de mesures de rayonnement appropriées.

D'une manière générale, les réponses à cette question donnent à penser que les intervenants ont de la difficulté à aller chercher les données dont ils ont vraiment besoin, et à comprendre les subtilités des calculs de rayonnement solaire. Le manque d'ouvrage de référence pour les non-spécialistes se fait manifestement sentir. Le présent document devrait répondre à la plupart des requêtes exprimées. En ce qui concerne la première demande (pour toutes les notions de base), différentes contraintes nous ont empêché d'y répondre en détail, mais les intervenants devraient trouver ce qu'ils cherchent en consultant la bibliographie située à la fin du chapitre 1. En ce qui concerne l'évaluation du gisement solaire au Québec, la référence [6.15] devrait apporter les éléments nécessaires aux concepteurs utilisant des méthodes simples.

-Question 11a - Quel(s) modèle(s) de calcul du rayonnement solaire voudriez-vous voir analyser et tester dans notre étude?

ASHRAE	4
Won	1
Davies	1
Goldberg & Klein	1
Hay	1
Type Angström	1

Les autres réponses ont été faites sous forme de commentaires, nous laissant généralement le choix des modèles à tester.

Suggestions supplémentaires: évaluation du rayonnement réfléchi, calcul du diffus à partir du global sur une base horaire, calcul du diffus et du direct à la minute près, modèles pour le calcul sur les plans inclinés, modèles les plus fidèles de la réalité, ou les plus appropriés pour le Québec.

Question 12a - Dans le but de préciser les suites à donner à notre étude, quels résultats numériques devraient être disponibles d'après vous?

Les nombreuses suggestions ont été regroupées en plusieurs thèmes:

- Décortiquer et publier les données météorologiques existantes pour le Québec, publier toutes les données générales sur le rayonnement solaire, publier des statistiques facilement utilisables pour calculs rapides.

- Publier de nombreuses statistiques (rayonnement, ensoleillement, température, chute de neige, etc.) pour les grandes régions climatiques du Québec.

- Evaluer la probabilité d'avoir une énergie incidente supérieure à un certain seuil pendant des périodes choisies (séquences de jours consécutifs).

- Données de rayonnement reconstituées pour différentes régions typiques et différents plans inclinés.

- Données de rayonnement réfléchi pour différentes régions et les variations de l'albédo.

- Préparer des années-type (moyennes et extrêmes) sur la base de moyennes à court terme, moyen terme, ou long terme.

- Evaluer les probabilités de disponibilité du rayonnement solaire, horaire, en coincidence avec la valeur des autres paramètres météorologiques importants (température, vent...).

Il apparaît ici encore (comme à la question 3a) qu'un certain nombre de répondants ne sont pas bien informés sur les publications existantes de statistiques de rayonnement ou de données météo. Le Service de l'environnement atmosphérique (Environnement Canada) et le Service de météorologie du Québec (Ministère de l'environnement du Québec) sont des services publics qui essayent de répondre au mieux aux besoins des utilisateurs. Des requêtes peuvent leur être adressées si les données nécessaires ne sont pas disponibles sous forme de publications, ou nécessitent leur stockage sur ruban magnétique.

Il est cependant certain qu'il existe encore bien des efforts à faire pour contenter tous les intervenants en énergie solaire dont les demandes -on le voit ici- sont très étendues et touchent dans une grande proportion la publication de données synthétiques. On peut espérer que les résultats du présent travail pourront être utilisés par les services publics pour l'élaboration des tables ou atlas climatiques réclamés par ces intervenants.

En attendant, le besoin en données reconstituées de rayonnement incident sur des plans inclinés (en relation avec la température) peut être partiellement comblé (pour quelques rares stations au Québec) par les tables publiées par Environnement Canada (voir la référence [1.3]) ou celles qui ont été préparées par notre équipe et contenues à la référence [6.15]. De plus, quelques exemples de probabilités d'occurence de périodes de jours

consécutifs d'irradiation donnée ont été donnés pour Montréal (voir la référence [2.21]).

Question 12b - Sous quelle forme souhaiteriez-vous avoir ces résultats?

- tableaux
- courbes et graphiques
- cartographies
- bandes magnétiques pour données horaires (4 réponses)
- mini-disques pour micro-ordinateur (1 réponse)
- cartes perforées (1 réponse)
- formules pour programmer (1 réponse)
- exemples pour différentes applications (1 réponse)

Comme on pouvait s'y attendre après la question 12a, la grande majorité des repondents souhaitent utiliser des tableaux avant tout, ce qui implique encore un gros travail de préparation des données, qui exige peut-être de nouvelles études scientifiques et la collaboration des services publics concernés.

A2.2 Synthèse

- Sur les 106 questionnaires envoyés aux intervenants figurant dans le "Répertoire des intervenants québecois dans les énergies nouvelles" du Ministère de l'énergie du Quebec, 38 réponses ont été reçues entre juillet et décembre 1980.

- La plupart des répondants (79%) se trouvent impliqués au niveau de la conception de systèmes solaires, soit au niveau de la pratique professionnelle, soit au niveau de la recherche fondamentale et appliquée.

- La plupart des répondants ont déjà eu besoin d'informations et de données sur le rayonnement solaire, mais ont parfois eu de la difficulté à obtenir ce dont ils avaient besoin.

- La moitié des répondants a déjà utilisé un ou plusieurs modèles de calcul du rayonnement incident. Plusieurs méthodes sont rapportées, allant des modèles très simples pour des calculs en moyenne mensuelle (équation d'Angström par exemple), aux modèles nécessitant un ordinateur pour des calculs horaires (ASHRAE par exemple, qui apparaît d'ailleurs nettement le modèle le plus utilisé). Les résultats et conclusions apportées par ce document devraient donc satisfaire une grande partie des intervenants.

- Ceux qui font des calculs d'estimation du rayonnement solaire ont recours soit à l'ordinateur soit aux calculatrices program-

mables, soit aux deux.

- De nombreux programmes de simulation thermique des bâtiments sur ordinateur sont utilisés par 11 répondants. Par contre, les programmes de simulation pour calculatrice sont encore inusités. Il serait intéressant de renouveler cette enquête pour tenir compte de la percée rapide des micro-ordinateurs, qui a commencé entre-temps.

- La méthode de design "f-chart" est utilisée par 47% des répondants.

- Les répondants manifestent nettement le désir de disposer d'un genre de "manuel du rayonnement solaire", où les notions de base, les équations astronomiques, les différents types de calcul du rayonnement seraient exposés clairement. De plus, un tel manuel devrait contenir un grand nombre de tableaux de données statistiques sur le climat du Québec, de cartographies, de tableaux contenant des données reconstituées de rayonnement sur différents plans inclinés, éventuellement en relation avec d'autres paramètres météorologiques (température, vent...), des probabilités d'avoir des séquences de bonne ou mauvaise insolation pendant plusieurs jours...

  Enfin, plusieurs répondants désireraient disposer d'une ou plusieurs "années typiques" pour le rayonnement et la météorologie. Un tel outil a un intérêt pratique évident, mais est particulièrement délicat à définir du fait du grand nombre d'interactions possibles entre les paramètres à considérer. Plusieurs méthodes plus ou moins complexes ont déjà été proposées pour choisir ou reconstituer une année typique, mais de nouvelles recherches devraient être encore entreprises avant de pouvoir répondre à cette demande.

A2.3 Conclusion

Le contenu du présent document devrait répondre -au moins en partie- aux attentes très diversifiées des intervenants québécois impliqués dans le design solaire et qui se voient amenés à estimer le rayonnement solaire incident, ou à aller chercher l'information existante.

Par contre, de nombreuses requêtes -concernant en particulier la publication de tableaux de données climatiques, de cartographies, de reconstitution de données de rayonnement, etc.- sortent du cadre de l'étude scientifique poursuivie ici, et devraient plutôt être du ressort des services météorologiques publics.

Enfin, la nécessité de continuer la présente étude au niveau de l'analyse des modèles permettant le calcul du rayonnement sur des plans inclinés ressort à l'évidence, de même que celle de la publication d'un "manuel du rayonnement".

Bien que cette enquête n'ait pas la prétention d'avoir la valeur et la précision d'un véritable sondage -au sens statistique du terme-, elle apporte un premier éclairage sur l'attitude des intervenants (pour ne pas dire "pionniers") québécois en matière de rayonnement solaire et de données météorologiques. Une nouvelle enquête s'avérerait très utile dans un proche avenir pour savoir si les intervenants considèrent qu'ils ont obtenu les outils dont ils avaient besoin, grâce au résultat de recherches scientifiques ou de publications provenant des services publics concernés. Une telle enquête permettrait également de suivre l'évolution des besoins des intervenants, particulièrement en matière de micro-informatique.